DuctSIM

Manual del usuario



Mine Ventilation Services
1625 Shaw Ave., Suite 103
Clovis, CA 93611 USA
Teléfono: 1-(559) 452-0182
Fax: 1-(559) 452-0184
Email: support@mvsengineering.com

Índice

Lista de Figuras

Lista de Tablas

Lista de Ecuaciones

Tabla de símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad
A	Área de corte transversal	m^2 (ft^2)
d	Diámetro o diámetro hidráulico	m (ft)
C	Coeficiente de pérdida por choque	Sin dimensión
e	Altura de asperezas de ducto	m (ft)
f	Coeficiente de fricción Chezy Darcy	Sin dimensión
k	Factor de fricción Atkinson	kg/m^3 ($lbf\ min^2/ft^4$)
k_a	Factor de fricción Atkinson a densidad de aire estándar	kg/m^3 ($lbf\ min^2/ft^4$)
k_s	Factor de fricción Atkinson a densidad de aire real	kg/m^3 ($lbf\ min^2/ft^4$)
L	Longitud	m (ft)
p	Pérdida de presión	Pa (in.w.g.)
p_{shock}	Pérdida de presión debido a pérdida por choque	Pa (in.w.g.)
P_1	Presión total de ducto corriente arriba	Pa (in.w.g.)
P_2	Presión total de ducto corriente abajo	Pa (in.w.g.)
P_a	Presión total de ventilador a densidad de aire real	Pa (in.w.g.)
P_{er}	Perímetro de vía de aire	m (ft)
P_s	Presión total de ventilador a densidad de aire estándar	Pa (in.w.g.)
P_{Ti}	Presión total de ventilador en ramal "i"	Pa (in.w.g.)
Q	Cantidad de flujo de aire	m^3/s (kcfm)
ΔQ_m	Factor de corrección de malla Hardy Cross - Cantidad	m^3/s (cfm)
Q_i	Cantidad en ramal "i"	m^3/s (kcfm)
Q_1	Cantidad corriente arriba	m^3/s (kcfm)
Q_2	Cantidad corriente abajo	m^3/s (kcfm)
R	Resistencia de vía de aire – General	Ns^2/m^8 [gaul] (Unidad práctica - P.U.)
R_d	Resistencia de ducto por 100 m (100 ft) de ducto	Ns^2/m^8 (P.U.)
R_D	Resistencia para cada segmento de ducto	Ns^2/m^8 (P.U.)
R_{ED}	Resistencia equivalente de todo el ducto	Ns^2/m^8 (P.U.)
R_i	Resistencia de ramal "i"	Ns^2/m^8 (P.U.)
R_l	Resistencia de trayectoria de fuga por 100 m de ducto	Ns^2/m^8 (P.U.)
R_p	Resistencia de trayectorias de fuga discreta	Ns^2/m^8 (P.U.)
R_{shock}	Resistencia debida a pérdida por choque	Ns^2/m^8 (P.U.)
S_{Ti}	Pendiente de curva de ventilador en ramal "i"	$Pa/m^3/s$ (in.w.g. / kcfm)
u	Velocidad de aire	m/s (ft/min)
ρ	Densidad de aire	kg/m^3 (lb/ft^3)
ρ_a	Densidad de aire real	kg/m^3 (lb/ft^3)
ρ_s	Densidad de aire estándar = 1.2	kg/m^3 (lb/ft^3)

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción

En cualquier tipo de excavación subterránea, los sistemas de ventilación auxiliar representan un componente crítico del esquema de ventilación general. Sin una ventilación secundaria adecuada es imposible proporcionar suficiente aire a las galerías ciegas, sin importar la cantidad o calidad del aire en la entrada del ducto. En minería y construcción de túneles en nuestros tiempos, los problemas de ventilación del frente se complican por la gran cantidad de equipo diesel y los desarrollos en general más largos. El uso cada vez más intenso de motores diesel tiene como resultado el aumento en los niveles de calor, gas y partículas de diesel, y en general las excavaciones más profundas ocasionan cargas de calor más altas.

Las computadoras personales y los sistemas operativos fáciles de usar han impulsado el uso de programas de simulación de ventilación, que se hacen cada vez más populares para diseñar, optimizar, mejorar y mantener los sistemas de ventilación primarios (principales). El programa DuctSIM fue diseñado para ayudar en la simulación de sistemas de ventiladores auxiliares y ductos. De acuerdo con los datos alimentados, el usuario puede construir modelos y optimizarlos, tomando en cuenta el tipo y diámetro de ducto, pérdidas por choque, y la cantidad, tipo y distancia entre ventiladores auxiliares. El programa se puede usar para el diseño inicial, o para ayudar a solucionar problemas y mejorar instalaciones de ductos existentes. Este software fue diseñado para grandes instalaciones de ductos subterráneas (principalmente para minería y construcción de túneles), no así para sistemas de ductos industriales en edificios. Este documento es más que un Manual del usuario, también proporciona los antecedentes, teoría y datos empíricos en relación con el diseño de sistemas de ventiladores auxiliares y ductos.

1.2 Tipos de archivos

DuctSIM soporta dos diferentes tipos de archivos:

1. Archivos de ducto - *.dct
2. Archivos de base de datos de ventilador - *.fdb

Los archivos de ducto, designados con la extensión *.dct, guardan todos los datos que el usuario ha alimentado, incluyendo los ventiladores que se haya designado a ese ducto en particular. Los archivos de base de datos de ventilador representan los archivos de datos para el desarrollo, manipulación y almacenamiento de las curvas de ventilador.

1.3 Sistema operativo y requerimientos

DuctSIM fue desarrollado para Windows XP, 2000, NT y 95/98. El programa DuctSIM fue desarrollado usando el lenguaje de programación Microsoft Visual C++ en conjunto con el programa Objective Grid de Stingray Software Company. Las aplicaciones compiladas contienen todas las bibliotecas necesarias para funcionar con éxito dentro de los ambientes operativos Windows mencionados. La resolución de la pantalla debe ajustarse a cuando menos 800 × 600 pixeles para una vista óptima.

2 LISTA DE VISTAS DEL PROGRAMA

El programa DuctSIM consiste en siete vistas principales. Se tiene acceso a estas vistas ya sea desde el menú Vistas o presionando los botones de herramientas que se muestran en la Figura 1. A continuación explicamos brevemente cada vista, y se hablará de ellas con más detalle a lo largo del Manual:

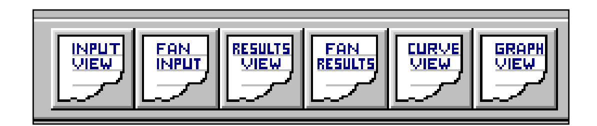


Figura 1: Botones de vistas

- La vista Alimentación (Input) resume los datos alimentados por el usuario. Los datos se alimentan en los cuadros de diálogo “Detalles del ducto” y “Pérdida por choque” y en la vista Alimentación de ventilador.
- La vista Alimentación de ventilador permite al usuario alimentar detalles sobre todos los ventiladores especificados en el ducto.
- La vista Resultados resume los resultados principales para la simulación.
- La vista Resultados de ventilador proporciona una lista detallada de todos los ventiladores y sus características de operación predichas.
- Vista Curva de ventilador. Esta vista dividida en dos muestra las características de operación de cada ventilador seleccionado. Los datos se presentan en una tabla y también gráficamente.
- La vista Gráfico proporciona una gráfica del flujo de aire y distribuciones de presión a todo lo largo del ducto. El usuario puede seleccionar ya sea cantidad o velocidad para el flujo de aire y presión total y/o presión estática. El usuario también puede cargar un esquemático de la configuración del ducto. Esto incluye la dirección del flujo de aire, ubicación y cantidad de ventiladores, la ubicación de las diferentes pérdidas por choque y las configuraciones de entrada y salida.
- Vista Base de datos de ventilador. Esta es una sección por separado del programa DuctSIM que aparece solo cuando el usuario abre un archivo de base de datos existente, o genera uno nuevo.

Los datos se alimentan por medio de una serie de cuadros de diálogo. Los cuadros de diálogo son formas que obligan al usuario a alimentar datos lógicos que describan por completo el ducto.

Todas estas vistas se discutirán a detalle en las siguientes secciones en los capítulos sobre alimentación de datos (Sección 3) y vista de resultados (Sección 4).

3 ALIMENTACIÓN DE DATOS

3.1 Unidades

El programa DuctSIM permite a los usuarios trabajar en unidades imperiales o SI. El usuario puede elegir con qué unidades trabajar al empezar un nuevo archivo, o puede convertir las unidades en bases de datos existentes usando la herramienta de Conversión de unidades en el menú Herramientas. En cualquier caso, se presenta al usuario el diálogo que se muestra en la Figura 2.

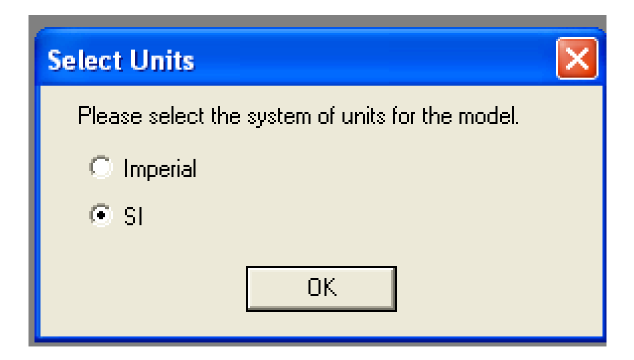


Figura 2: Herramienta de conversión de unidades

3.2 Cuadro de diálogo de detalles del ducto

El programa DuctSIM requiere que el usuario alimente ciertos datos. Las características físicas del ducto se alimentan en el cuadro de diálogo Detalles de ducto (Figura 3), y se deben alimentar siempre que se desarrolle un nuevo modelo DuctSIM.

Este cuadro de diálogo consiste en cuatro páginas tabuladas, que son:

- Resistencia (Resistance)
- Fugas (Leakage)
- Zonas (Zones)
- General (General)

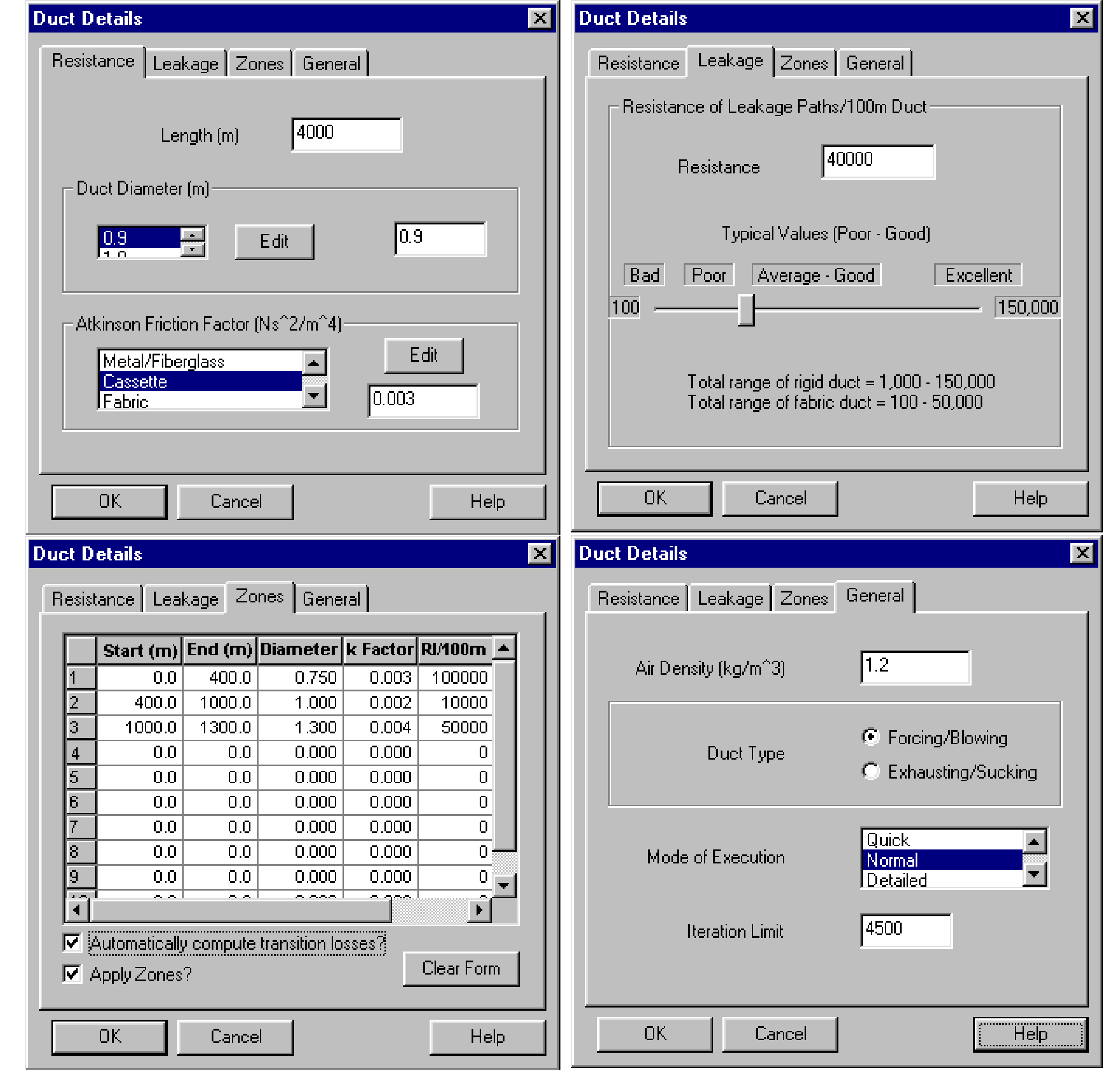


Figura 3: Cuadro de diálogo Detalles del ducto

3.2.1 Datos de resistencia

La página Resistencia (Resistance) permite al usuario alimentar el diámetro y longitud del ducto, y el factor de fricción Atkinson. El diámetro del ducto y el factor de fricción se pueden alimentar directamente, o seleccionarse en listas definidas por el usuario. Al presionar el botón Editar (Edit) junto a los cuadros de factor de fricción y lista de diámetro se tiene acceso a las listas definidas por el usuario (ver las siguientes figuras). Estos cuadros de diálogo permiten al usuario asignar nuevos valores y, en caso del factor de fricción Atkinson, descripciones de los criterios más usados.

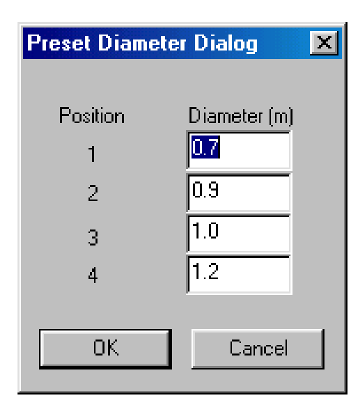


Figura 4: Cuadro de diálogo Lista de diámetro preestablecido

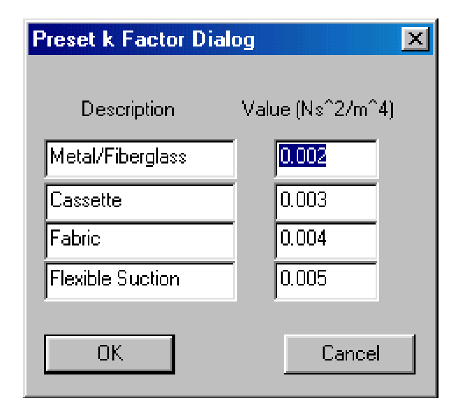


Figura 5: Cuadro de diálogo Factor de Atkinson preestablecido

Si el ducto no es redondo, se debe usar el diámetro redondo equivalente. En el caso de un ducto cuadrado o rectangular se debe aplicar el diámetro hidráulico al ducto. Este diámetro se obtiene con la siguiente ecuación (consulte la Tabla de Símbolos [página iv] para resolver todas las ecuaciones):

Ecuación 1 – Diámetro hidráulico: $d = \frac{4A}{P_{er}}$

3.2.1.1 Factor de fricción de Atkinson y teoría de resistencia

La diferencia de presión por fricción en las vías de aire se puede obtener resolviendo la siguiente ecuación:

Ecuación 2 – Ecuación de Darcy-Weisbach: $p = fL\frac{P_{er}}{A}\rho\frac{u^2}{2}$

Esta es una forma de la ecuación Chezy-Darcy (también conocida como Darcy-Weisbach) y aplica a vías de aire y ductos circulares y no circulares. El coeficiente de fricción Chezy-Darcy (sin dimensión) varía con respecto al Número Reynolds, cuya tendencia se traza en el diagrama Moody. Atkinson adaptó la ecuación de Darcy-Weisbach para llegar a la siguiente Ecuación de Atkinson, comúnmente usada:

Ecuación 3 – Ecuación de Atkinson: $p = kL\frac{P_{er}}{A}u^2$

El factor de fricción de Atkinson es una función de la densidad del aire y se calcula como:

Ecuación 4 – Factor de fricción de Atkinson: $k = \frac{f\rho}{2}$

Debido a que el coeficiente de fricción Chezy-Darcy no tiene dimensiones, el factor de fricción Atkinson lleva unidades de densidad (kg/m^3). La ecuación de Atkinson se puede expresar en términos de la resistencia de Atkinson para la vía de aire, donde:

Ecuación 5 – Ley Cuadrada: $R = \frac{p}{Q^2}$

Ecuación 6 – Resistencia de vía de aire: $R = kL\frac{P_{er}}{A^3}$

La Ley Cuadrada es una relación importante que se usa para establecer la resistencia a partir de datos medidos de presión y cantidad. La Ecuación 6 se usa para determinar la resistencia a partir de factores de fricción de Atkinson típicos, y la geometría de las vías de aire conocida o propuesta. Las unidades de resistencia son Ns^2/m^8, que es la misma unidad que el "gaul." Las unidades imperiales de resistencia se dan en la Unidad Práctica (P.U.), que es equivalente al indicador de agua 1 milli-inch Water Gauge / $(1\ kcfm)^2$. Es importante anotar que el término diferencia de presión por fricción en la Ley Cuadrada es directamente proporcional a la densidad del aire, como lo es también el factor de fricción de Atkinson. Por tanto, el factor de fricción de Atkinson que se aplica se debe ajustar a la densidad de aire real en la mina. El ajuste se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 7 – Ajuste de factor de fricción de Atkinson: $k_a = k_s\frac{\rho_a}{\rho_s}$

Al usar el factor de fricción de Atkinson es importante recordar que el factor no es constante para una determinada vía de aire, sino que varía con el Número de Reynolds. Sin embargo, en ventilación de minas es normal partir del supuesto de que el factor de fricción de Atkinson es constante, sin importar el régimen de flujo. Esto se debe a que, para flujo completamente turbulento (que por lo general es el caso en la ventilación de minas y túneles), el factor de fricción es sólo una función de la aspereza relativa de la vía de aire. La aspereza relativa de la vía de aire se define como la altura de las asperezas de la vía de aire (e) divididas entere el diámetro hidráulico. La Ecuación de Von Kármán (McPherson, 1993) proporciona la relación para el factor de fricción de Atkinson, el coeficiente de fricción y la aspereza relativa para flujo completamente turbulento, de la siguiente manera:

Ecuación 8 – Ecuación de Von Kármán: $$f = \frac{2k}{\rho} = \frac{1}{4\left[2\log_{10}\left(\frac{d}{e}\right) + 1.14\right]^2}$$

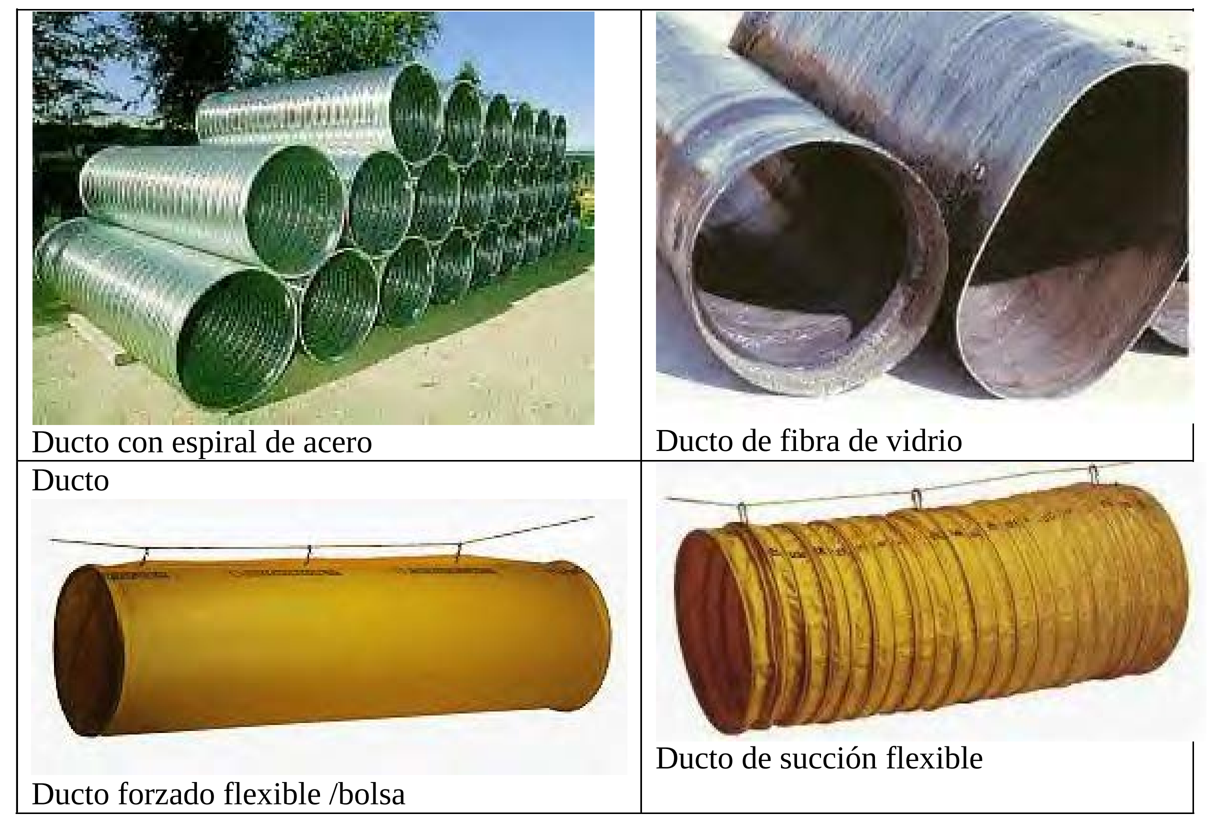
En esta ecuación se puede observar que en ductos con las misma aspereza de superficie (altura de asperezas) pero de diferente diámetro variará el factor de fricción de Atkinson. Por tanto, al aumentar el diámetro del ducto, mientras todas las demás condiciones permanecen sin cambio, tanto la aspereza relativa como el factor de fricción de Atkison disminuyen.

La Tabla 1 proporciona una lista de factores de fricción típicos para ductos de ventilación. Estos son factores de fricción reales medidos en secciones rectas de ductos de ventilación en minas y túneles. Si el usuario tiene razón para creer que el ducto no será recto, entonces se recomienda que se aplique un factor de corrección de instalación o aspereza. Las referencias típicas (Wolski and Barry, 1997) sugieren que este factor de corrección debería estar en el rango de 1.3 a 1.4 (30 a 40% más alto).

La Figura 6 muestra fotografías de los tipos de ductos que aparecen en la Tabla 1, que son los más comúnmente usados en actividades de construcción subterránea.

Tipo de ducto	Factor k kg/m^3 ($x10^{-10}$ lbf min^2/ft^4)	Coeficiente de fricción
Ducto de acero		
Con espiral, galvanizado	0.004 (21.6)	0.007
Ducto de acero dulce, lámina lisa	0.003 (16.2)	0.005
Ducto de fibra de vidrio	0.003 (16.2)	0.005
Ducto forzado /bolsa		
Ducto ligero	0.003 (16.2)	0.005
Ducto pesado – chico	0.004 (21.6)	0.007
Ducto de casete TBM	0.004 (21.6)	0.007
Ventilación de frente – Muy mala instalación	0.025 (135)	0.042
Ducto flexible reforzado		
Extracción flexible – Excelente instalación	0.004 (21.6)	0.007
Extracción flexible – Flojo	0.010 (53.9)	0.017

Tabla 1: Valores de factor de fricción de Atkinson para ductos típicos



Ducto con espiral de acero

Ducto de fibra de vidrio

Ducto forzado flexible /bolsa

Ducto de succión flexible

Figura 6: Figura que muestra los tipos típicos de ducto (de Schauenburg Flexadux Corporation)

3.2.1.1.1 Ducto con espiral de acero

El ducto con espiral de acero se usa tanto para inyección como para extracción. El ducto de acero tiene la ventaja de que se puede formar en el sitio y muchas minas tienen un taller exclusivo para esta actividad. El ducto se puede fabricar de diferentes calibres para cubrir las necesidades de resistencia y costo. Los diámetros típicos para este ducto van de 150 a 2,450 mm (0.5 a 8 pies).

Aspectos generales:

- Ducto de succión de más bajo costo inicial
- No inflamable
- Sostiene alta presión positiva y negativa
- Fuga media
- Bajo factor de fricción

Principales usos:

- Corridas de ventilación de longitud moderada (menos de 3,000 m [10,000 pies])
- Aplicaciones de un solo uso (el ducto se doblará si se deja caer, lo que tendrá como resultado un sellado deficiente de las juntas)

3.2.1.1.2 Ducto de fibra de vidrio

Los ductos de fibra de vidrio están diseñados para soportar impactos y altas presiones negativas o positivas. Estos ductos rígidos son específicos para aplicaciones críticas, pues sus principales características incluyen poco peso, excelente resistencia a la corrosión y alto rendimiento para fácil instalación y reuso. Este ducto en ocasiones se surte en una configuración ovalada en la que el espacio libre está limitado. El tamaño típico varía de alrededor de 300 a 1,200 mm (1 a 4 pies). La longitud típica del ducto es de 6 metros (20 pies). Los sellos incluyen neopreno para ambientes limpios y acídicos, sin sello para aplicaciones de baja presión y corridas cortas y sellos elásticos para ambientes polvosos.

Aspectos generales:

- Ducto de succión más durable
- Peso ligero
- Sostiene ala presión positiva y negativa
- Bajo factor de fricción
- Fuga media
- Relativamente caro

Principales usos:

- Corrida de ventilación corta (menos de 1,500 m [5,000 ft])
- Operaciones de reuso múltiple
- Desarrollo de minas

3.2.1.1.3 Ducto forzado flexible/bolsa

El ducto forzado flexible también se conoce como bolsa, o ducto horizontal. Este ducto está diseñado para aplicaciones de presión positiva, y es el ducto estándar usado en minas de roca dura, debido primordialmente a su bajo costo inicial y facilidad de instalación. Las costuras y los grommets por lo general se deben soldar para quedar herméticos, y proporcionar una baja resistencia al flujo de aire. Los diámetros típicos varían de 150 a 2,450 mm (0.5 a 8 ft). El ducto también se puede surtir en tramos de hasta 300 metros (1,000 pies) para aplicaciones como máquinas perforadoras de túnel (TBM). Se puede usar varios grados diferentes de material para asegurar que satisfagan necesidades de presión y durabilidad específicas.

Aspectos generales:

- Alta fuga en ventilación de frente. Relativamente baja fuga en aplicaciones de TBM
- Factor de fricción medio
- Diferentes grados disponibles
- Bajo costo
- Fácil instalación

Principales usos:

- Todos los tipos de ventilación:
    - Corridas de ventilación cortas para ventilación de frente
    - Corridas de ventilación largas, en especial al usar sistemas tipo casete para túneles TBM Flexible Exhaust Duct

Los ductos de succión flexibles son ideales para la ventilación de extracción en la que se requiere un ducto de peso ligero y fácil de transportar. El ducto por lo general está hecho de

polyester y nylon recubierto con PVC y reforzado con un resorte de acero helicoidal. Los diámetros estándar van de 150 a 1,500 mm (0.5 a 5 ft), con largos estándar de 3, 4.5, o 7.5 metros (10, 15, o 25 pies). La distancia entre vueltas del resorte de acero puede variar según se requiera.

Aspectos generales:

- El peso depende de la capacidad de presión negativa
- Se puede almacenar en un área pequeña
- Si tiene la tensión correcta factor de fricción medio, de lo contrario las pérdidas por fricción pueden ser muy altas

Principales usos:

- Inicio de túneles
- Corridas de ventilación cortas
- Conexiones flexibles a otros tipos de ductos

3.2.2 Datos de fuga y teoría de redes

La página de fugas (que se puede ver en la Figura 3) cuenta con un botón deslizable que permite al usuario seleccionar la fuga a partir de una evaluación de la calidad de la instalación del ducto (de mala a excelente). El usuario también puede alimentar la resistencia a la fuga directamente. Este parámetro es una resistencia, que se da en Ns^2/m^8 por 100 m de ducto o Unidades Prácticas (P.U.) por 100 pies de ducto (ver la Tabla 2).

Es inevitable que cierto grado de fuga se relacione con los ductos de ventilación. Cuantificar y predecir esta fuga es una tarea compleja, y ha sido el tema de amplia investigación durante los últimos 50 años. Existen tres métodos básicos para el análisis de problemas de flujo en ductos con fuga:

1. Análisis matemático para un ducto con fuga distribuida uniformemente. Esta técnica usa un análisis complejo que tiene como resultado una integral que se tiene que resolver numéricamente.
2. Suponer varias trayectorias de fuga discreta, lo que permite tratar el ducto con fuga como una red de ventilación. Por lo general este problema de red se resolvería usando una técnica iterativa como la de Hardy Cross.
3. Suponer varias trayectorias de fuga discreta, lo que permite tratar el ducto con fuga como una combinación de flujos de aire en serie-paralelos a lo largo del ducto y a través de trayectorias de fuga.

El programa DuctSIM utiliza tanto la técnica Hardy Cross como el método En Serie-Paralelo para la solución de redes de ventilación de ductos. El método Hardy Cross se usa en todos los casos excepto en caso de que el usuario elija correr la simulación con una cantidad fija. En este escenario, se quitan todos los ventiladores del ducto, y se realiza un análisis simplificado usando el método En Serie-Paralelo.

3.2.2.1 Técnica iterativa Hardy Cross Iterative Technique

La técnica Hardy Cross implica hacer un estimado inicial de la distribución del flujo de aire, calcular una corrección aproximada a aplicarse a cada ramal, y después repetir el procedimiento de corrección de manera iterativa hasta que se obtenga un grado de exactitud aceptable. Se usa la siguiente ecuación para determinar la corrección que se debe aplicar a cada malla en la red:

Ecuación 9 – Técnica Hardy Cross: $$\Delta Q_m = \frac{-\Sigma\left(R_i Q_i |Q_i| - P_{Ti}\right)}{\Sigma\left(2R_i |Q_i| + S_{Ti}\right)}$$

A diferencia del programa de simulación de redes de ventilación tradicional, el programa DuctSIM no cuenta con una rutina de selección de malla. Debido a la naturaleza de un sistema de ductos, se puede desarrollar una red simple que incorpore el ducto, galería, trayectorias de fuga del ducto y el frente. En la Figura 7 se muestra una red de dos mallas. El programa DuctSIM parte del supuesto de que la galería y el frente tienen una resistencia de cero. Esto simplifica el análisis y se justifica por el hecho de que las diferencias de presión relacionadas con el ducto por lo general son de una magnitud superior a la encontrada en la galería. Esta simplificación tiene como resultado un error importante cuando el ducto penetra en un tapón o regulador. En este caso habrá una resistencia considerable relacionada con la estructura en la galería que no se tomará en cuenta.

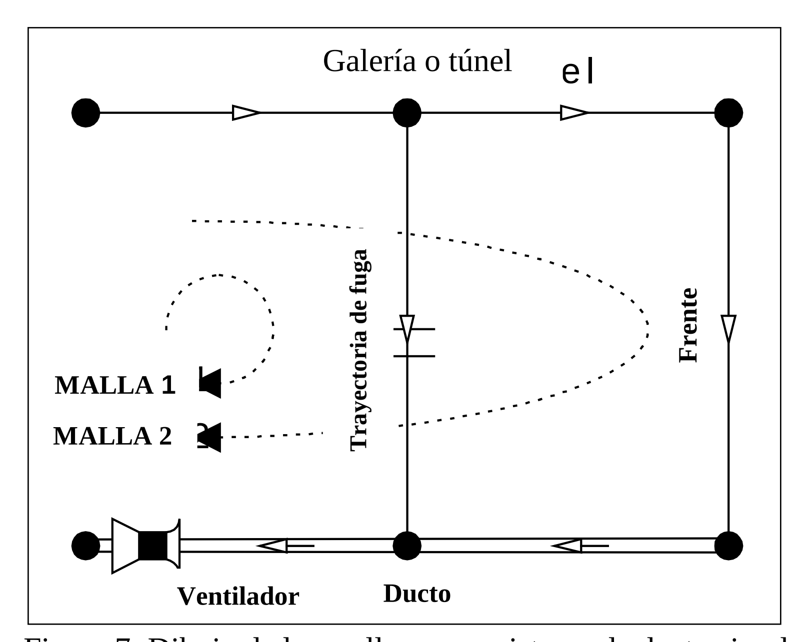


Figura 7: Dibujo de las mallas en un sistema de ducto simple

Para la red, el número de mallas es igual al número de trayectorias de fuga discreta más uno. Para la aplicación DuctSIM, el número de trayectorias de fuga se establece automáticamente en 99, de manera que el ducto se divide en 100 segmentos iguales. Se encontró que con esto se puede alcanzar un buen equilibrio entre tiempo de ejecución/cálculo (al aumentar el número de ramales de alta resistencia aumenta el número de iteraciones), y la exactitud (demasiado pocos ramales de fuga no representarían con precisión una instalación de ducto largo).

3.2.2.2 Método En Serie-Paralelo

La Figura 8 muestra una representación de red de un ducto con fuga. En este caso el ducto tiene “n” juntas o trayectorias de fuga, cada una de las cuales tiene la resistencia que denota R_p. Esto divide efectivamente el ducto en “n+1” segmentos de igual longitud, habiéndose asignado a cada uno una resistencia R_D. También se parte del supuesto de que:

- La presión ambiente fuera del ducto es la misma en todos los lugares a lo largo del ducto.
- La resistencia del frente es cero.

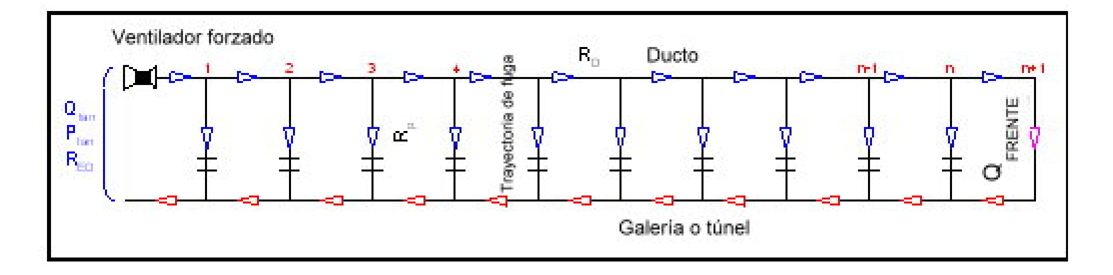


Figura 8: Diagrama de red para solución en serie-paralelo de redes de ventilación

A partir de la teoría de resistencia paralela, la resistencia equivalente de la malla final en el frente es (denotado con $R_{n-(n+1)}$, que es la resistencia de la zona de unión de “n” a “n+1”):

Ecuación 10 – Resistencia Equiv. (i):

$$\frac{1}{\sqrt{R_{n-(n+1)}}} = \frac{1}{\sqrt{R_D}} + \frac{1}{\sqrt{R_p}}$$

Que se reduce a:

Ecuación 11 – Resistencia Equiv. (ii):

$$R_{n-(n+1)} = \frac{R_D \times R_p}{\left(\sqrt{R_p} + \sqrt{R_D}\right)^2}$$

Si se añade la siguiente malla, entonces la resistencia equivalente de las dos últimas mallas, de “n-1” a “n+1”, se convierte en:

Ecuación 12 – Resistencia Equiv. (iii):

$$\frac{1}{\sqrt{R_{(n-1)-(n+1)}}} = \frac{1}{\sqrt{R_D + R_{n-(n+1)}}} + \frac{1}{\sqrt{R_p}}$$

Por tanto, al repetir este proceso a lo largo de todas las mallas se puede determinar la resistencia equivalente general del ducto (indicada como R_{ED}). En el caso del programa DuctSIM, la solución En Serie-Paralelo solo se aplica para un análisis de cantidad fija, cuando se parte del supuesto de que el ventilador está al principio (0 m) del ducto (como se muestra en la Figura 8). Si se conoce la cantidad en el ventilador, entonces el requerimiento del ventilador (presión total) se determina aplicando la Ley Cuadrada:

Ecuación 13 – Presión de Ventilador En Serie-Paralelo: $P_{fan} = R_{ED} \times Q_{fan}^2$

Usando una cantidad inicial y los valores de resistencia determinado con las fórmulas anteriores, se evalúa el flujo de aire y las presiones a lo largo de la red directamente sin iteración.

3.2.2.3 Resistencia de las trayectorias de fuga

La fuga se cuantifica en DuctSIM usando la unidad de resistencia de fuga por 100 m de ducto. Se puede usar la siguiente relación (Ecuación de Woronin, Vutukuri, 1986) para ayudar a cuantificar este parámetro a partir de datos medidos para instalaciones de ducto existentes. En este caso R_l es la resistencia de trayectoria de fuga por 100 m de largo de ducto, Q_1 es la cantidad corriente arriba y Q_2 es la cantidad corriente abajo.

Ecuación 14 – Ecuación de Woronin: $$R_l = \frac{R_d \times \left(\frac{L}{100}\right)^3}{\left(3 \times \left[\sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}} - 1\right]\right)^2}$$

La siguiente fórmula (Browning, 1983) se puede usar para estimar R_d a partir de datos medidos. Es necesario hacerlo de esa manera, usando una cantidad media ponderada, porque la fuga a lo largo del ducto es continua y varía. La Ley Cuadrada (Ecuación 5) sólo se debe usar para evaluar la resistencia de la vía de aire cuando la cantidad es razonablemente constante a lo largo de toda la sección medida.

Ecuación 15 – Fórmula Browning's: $$R_d = \frac{(P_1 - P_2)}{L}\left[\frac{5}{2Q_1 + 3Q_2}\right]^2$$

La resistencia de fuga es en extremo sensible a la fuga de flujo de aire del ducto, de manera que un deterioro relativamente pequeño en un ducto puede resultar en una diferencia de magnitud importante en la resistencia de fuga. En este sentido, la resistencia de fuga es un parámetro difícil de medir, y también es una tarea difícil asignar un valor adecuado a instalaciones de ducto tanto propuestas como existentes. La fuga de los ductos se ve afectada por el material del ducto, la calidad de la instalación, la cantidad de juntas, longitud total, diferencia de presión entre el interior y el exterior del ducto y el diámetro del ducto. Para ayudar al usuario a seleccionar una resistencia de fuga adecuada, se proporciona una serie de valores de diseño típicos en la Tabla 2. Estos valores se han calculado con base en medidas de flujo de aire real y presión tomadas en diferentes instalaciones de ductos.

El botón deslizable de fuga en DuctSIM proporciona un rango de resistencia de fuga de 100 a 150,000 Ns^2/m^8 (962.5 a 1,443,750 P.U.). El límite superior representa una instalación de ducto extremadamente buena. Se recomienda que el usuario teclee valores realistas para la fuga de ducto, para evitar errores de diseño.

Condición de fuga	Resistencia de trayectorias de fuga por 100m de ducto (Ns^2/m^8)	Resistencia de trayectorias de fuga por 100 pies de ducto (P.U.)
Ducto rígido		
Excelentes condiciones	150,000	1,443,750
Buenas condiciones	120,000	1,155,000
Regulares condiciones	40,000	385,000
Malas condiciones	1,000	9,625
Ducto flexible		
Ducto casete TBM excelente	50,000	481,250
Ducto típico de mina	1,500	14,438
Regulares condiciones	100	962.5

Tabla 2: Resistencia de fuga típica por 100 m o 100 pies de ducto

3.2.3 Zonas

La página de Zonas (ver Figura 3) permite al usuario dividir el ducto en una o más zonas, cada una de las cuales puede tener características físicas diferentes. Los datos se alimentan en una tabla que tiene columnas para la distancia inicial, distancia final, diámetro del ducto, factor de fricción de Atkinson y resistencia de fuga. El programa DuctSIM ajustará estas longitudes para adaptarlas a la trayectoria de fuga más cercana. El software asigna internamente al ducto 99 trayectorias de fuga espaciadas equitativamente entre sí, obteniendo 100 segmentos idénticos. Por tanto, la corrección más grande que se haga a una longitud será la mitad de un segmento o alrededor de 1/200th de la longitud total del ducto. Este proceso se ilustra en la Figura 9, que muestra una instalación de ducto de dos partes. La primera sección es un ducto con espiral de acero que se convierte en una bolsa forzada flexible más chica. Se puede ver que el punto de transición no corresponde con exactitud a un punto de fuga, por tanto el programa DuctSIM ajusta automáticamente el punto del final de la Zona 1 con el punto de inicio de la Zona 2.

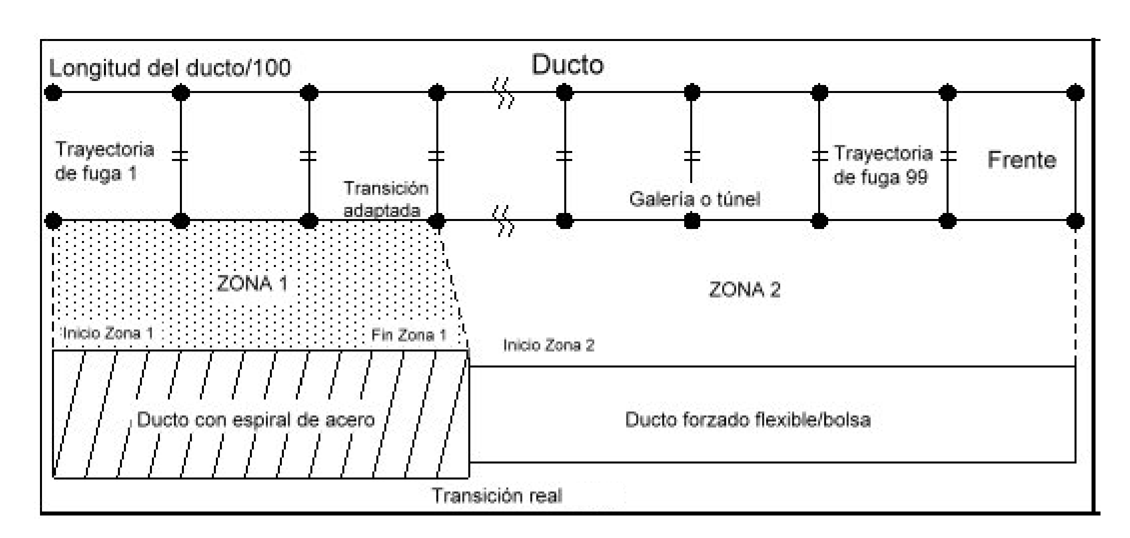


Figura 9: Explicación del concepto de zonas

Es importante que el usuario alimente suficiente información de la zona para describir toda la longitud del ducto. Las zonas se deben conectar para formar una descripción continua del

ducto desde el inicio hasta el fin. El usuario también puede elegir si aplicar o ignorar la información de la zona, quitando o poniendo zonas.

La página de Zonas también tiene una etiqueta que permite al usuario incluir automáticamente las pérdidas por choque en transición relacionadas con los cambios en área a lo largo del ducto. El programa determina si la transición será una contracción o una expansión, lo que depende del área relativa de zonas adyacentes y la dirección del flujo de aire (si se está inyectando o extrayendo). Se parte del supuesto de que la transición es abrupta. Si el usuario requiere una transición gradual, entonces la resistencia de la pérdida por choque se debe calcular y alimentar manualmente. Consulte en la Sección 3.3 y en la Tabla 3 los detalles sobre las pérdidas por choque.

Por lo general, la herramienta de zonas no se usará para aplicaciones de ducto típicas. Esto añade un nivel de complejidad al análisis y no se recomienda, a menos que el ducto tenga secciones con un cambio importante de diámetro, factor de fricción o fuga.

3.2.4 General

La página General (ver Figura 3) permite al usuario alimentar una densidad de aire promedio, y también seleccionar si el ducto está inyectando o extrayendo aire.

La densidad de aire del ducto se usa durante el procedimiento de cálculo del ventilador. Se hace una corrección automáticamente a cada curva de características del ventilador con base en la relación entre la densidad de aire para la curva de ventilador (por lo general proporcionada en un nivel estándar/a nivel del mar = 1.2 kg/m^3) y la densidad de aire del ducto. Este proceso de conversión se describe en la Sección 3.4.

Se requiere que el usuario especifique si el ducto está inyectando o extrayendo para asegurar que las pérdidas por choque del ducto se calculen correctamente, y para proporcionar las tendencias gráficas correctas. Es importante notar que los valores de fuga del ducto no se ajustan automáticamente cuando el usuario cambia de un sistema de inyección a uno de extracción. En la práctica, es probable que la resistencia de fuga relacionada con un ducto de extracción (que está predominantemente bajo una presión negativa) sea más alta que en un sistema de inyección, debido a que las juntas están mejor selladas. Si se requiere, el usuario tendrá que alimentar manualmente cualquier cambio en el valor de resistencia de fuga.

Además, esta página permite al usuario cambiar los parámetros de tiempo de corrida por omisión del software. DuctSIM tiene un modo de ejecución por omisión llamado “Normal”, con la opción de seleccionar ya sea “Rápido” (Quick) o “Detallado” (Detailed). Esto básicamente ajusta la exactitud de cierre para la solución iterativa usada para la técnica Hardy Cross. El modo “Rápido” proporciona un cierre absoluto en cualquier ramal de menos de 0.01 m^3/s (21 cfm), “Normal” cierra cuando está dentro de 0.001 m^3/s (2.1 cfm), en tanto que “Detallado” requiere un cierre de menos de 0.00001 m^3/s (.02 cfm) para todos los ramales. De acuerdo con el problema de ducto particular tal vez el usuario quiera cambiar el modo de ejecución por omisión, ya sea para acelerar la velocidad de la ejecución para corridas de prueba, o por el contrario para obtener los resultados más precisos. El usuario también puede cambiar el límite en el número de ejecuciones. Este está preestablecido en 5,000, después de lo cual la solución Hardy Cross se detendrá, y los resultados para la última iteración se imprimirán. Para algunos casos, en especial ductos largos con alta tasa de fuga, y cuando el usuario ha seleccionado “Detallado” para la exactitud, tal vez el usuario tenga que aumentar el límite de iteración.

Para el diseño de ducto normal, el usuario no tiene que cambiar ni el límite de iteración ni el modo de ejecución.

3.2.4.1 Sistemas de ducto de inyección versus extracción

Inyectar ventilación proporciona flujo de aire positivo al frente. El aire sale por el extremo del ducto con impulso, y por tanto se le aventará por la galería hacia el frente. Este efecto ayuda a mezclar y nivelar los estratos y extraer gases de las áreas del frente y proporciona un cierto grado de enfriamiento por convección a los trabajadores que se encuentren en el área. Además, el ventilador y el motor siempre están en aire fresco. La principal desventaja de esto es que todo el túnel está extrayendo aire contaminado del frente. Esto puede ocasionar condiciones de trabajo desagradables e insalubres y puede demorar el tiempo para volver a entrar después de una voladura. En la Figura 10 se muestra un sistema de inyección típico.

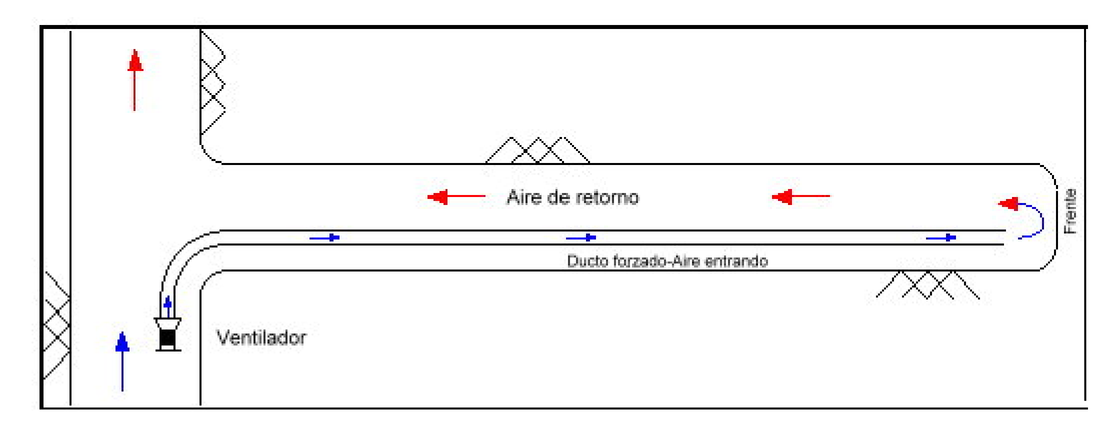


Figura 10: Sistema de ventilación de inyección típico

La ventilación de extracción es una opción que permite mantener libre toda el área del túnel. Además, el aire contaminado en el ducto se puede filtrar antes de descargarse. En la siguiente figura se muestra un sistema de ducto de extracción típico.

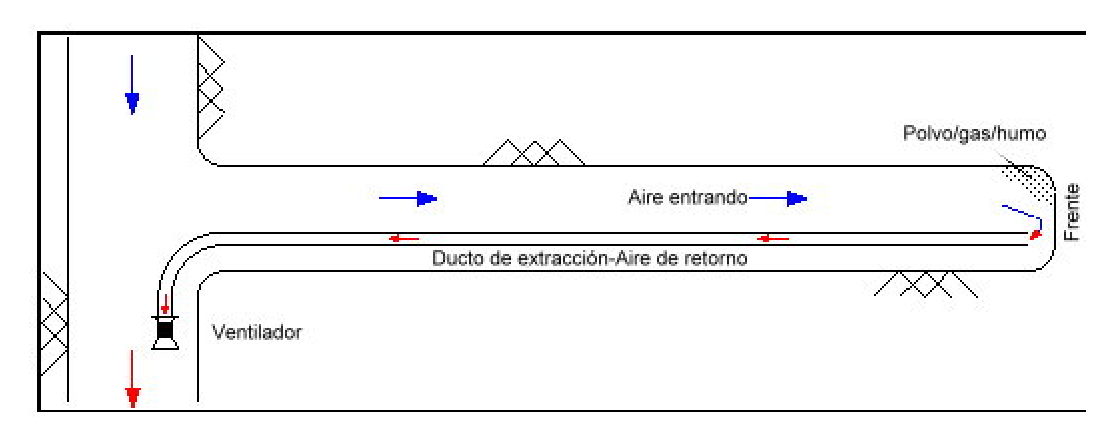


Figura 11: Sistema de ventilación de extracción típico

La desventaja con la ventilación de extracción es una cantidad de frente baja que requiere que el ducto se mantenga cerca del frente de trabajo (menos de 3 m [10 pies] para un movimiento de aire efectivo). Esto se ilustra en la Figura 12.

Se muestra una entrada de ducto de extracción, con contornos que muestran el porcentaje de la velocidad de aire del ducto conforme va entrando al ducto. Por ejemplo, a una distancia de 0.5 × el diámetro del ducto, en una dirección en línea con el ducto, la velocidad es de alrededor del 30 % de la que hay en el ducto.

Un caso refinado de extracción es el ducto de extracción con un sistema de inyección por traslape (también conocido como sistema "carroñero"). En este caso el ducto de extracción se lleva hasta un punto a más o menos 30 m (100 pies) del frente. Un ducto de inyección de diámetro más pequeño entra a aproximadamente 10 m (33 pies) de la entrada del ducto de extracción y lleva el aire al frente. Las desventajas de esta configuración incluyen:

1. La calidad del aire que llega al frente por lo general es inferior a la del sistema de inyección. El aire que se mueve con lentitud puede recoger calor, polvo y gases mientras pasa por el túnel o la galería.
2. Se requieren dos ductos y ventiladores.

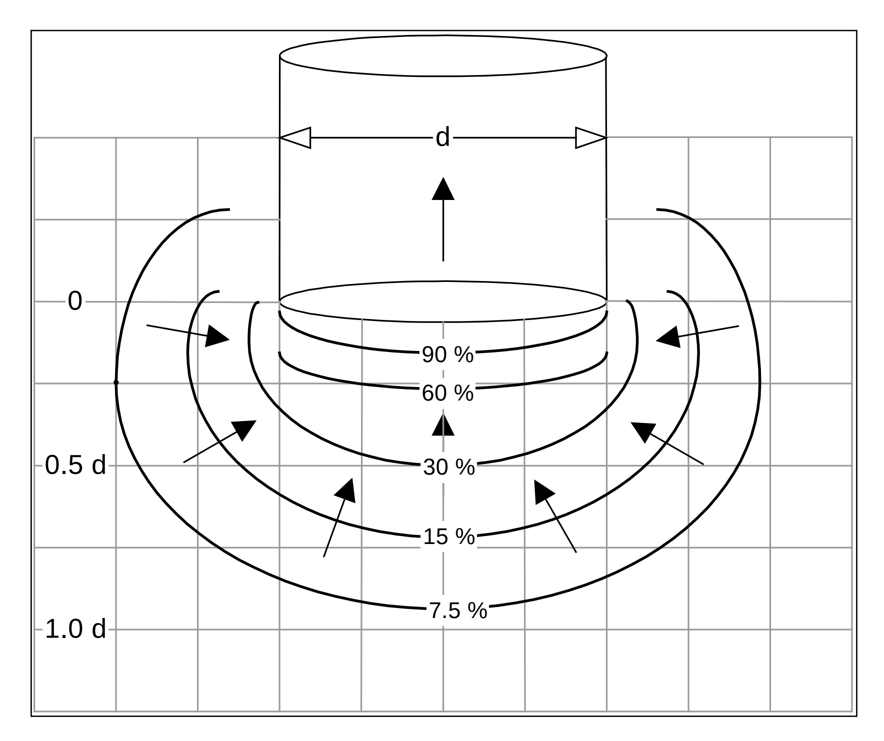


Figura 12: Reducción en la velocidad del aire con la distancia – Ducto de extracción (conforme a Black et al., 1978)

3. Se tiene que mantener instalaciones eléctricas a lo largo de la labor y cerca del frente.
4. La transición en el traslape puede tener como resultado malas condiciones.
5. Se debe tener cuidado para evitar la recirculación en el ducto de extracción si hay múltiples ventiladores a lo largo del ducto.
6. Se requiere indicar el espacio libre para el equipo en el traslape debido a la presencia de dos ductos en la galería o túnel.

En la Figura 13 se muestra un ducto de extracción con inyección por traslape

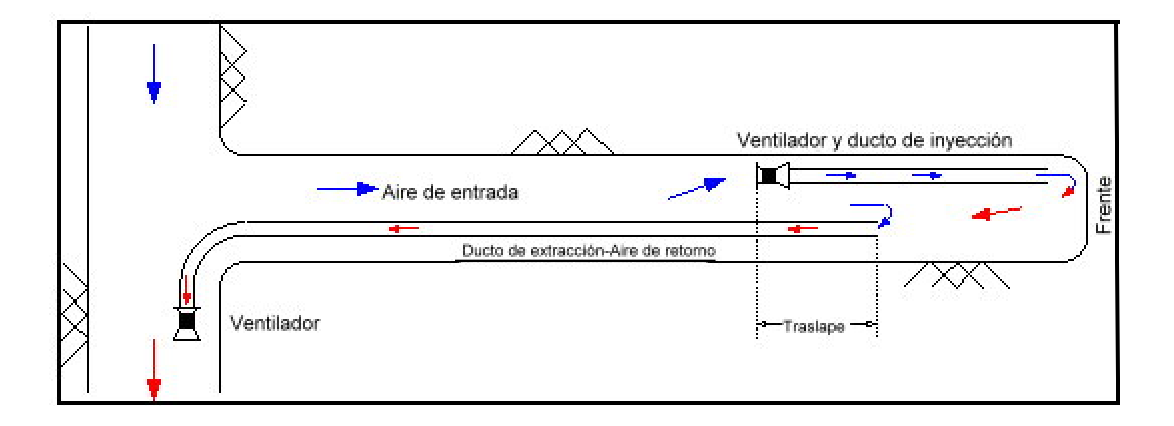


Figura 13: Ducto de extracción típico con traslape de inyección

La opción final es el ducto de inyección con un traslape de extracción. En la Figura 14 se muestra un ejemplo de esta configuración. En este caso se logran las ventajas de un sistema de inyección, pues el ducto puede ser flexible, se puede usar enfriadores para enfriar directamente el frente cerca del área de trabajo y se puede usar una alta velocidad de descarga para limpiar el frente. El ducto carroñero de extracción permite que una porción del aire del frente se filtre, lo que ayuda a mantener condiciones de calidad de aire aceptables a lo largo del túnel.

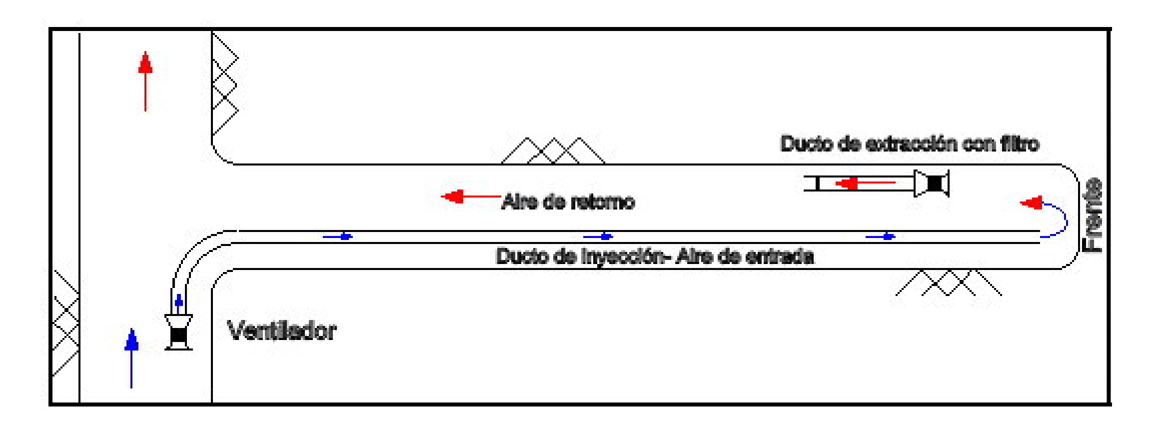


Figura 14: Ducto de inyección típico con carroñero de extracción

3.2.5 Rangos de datos alimentados

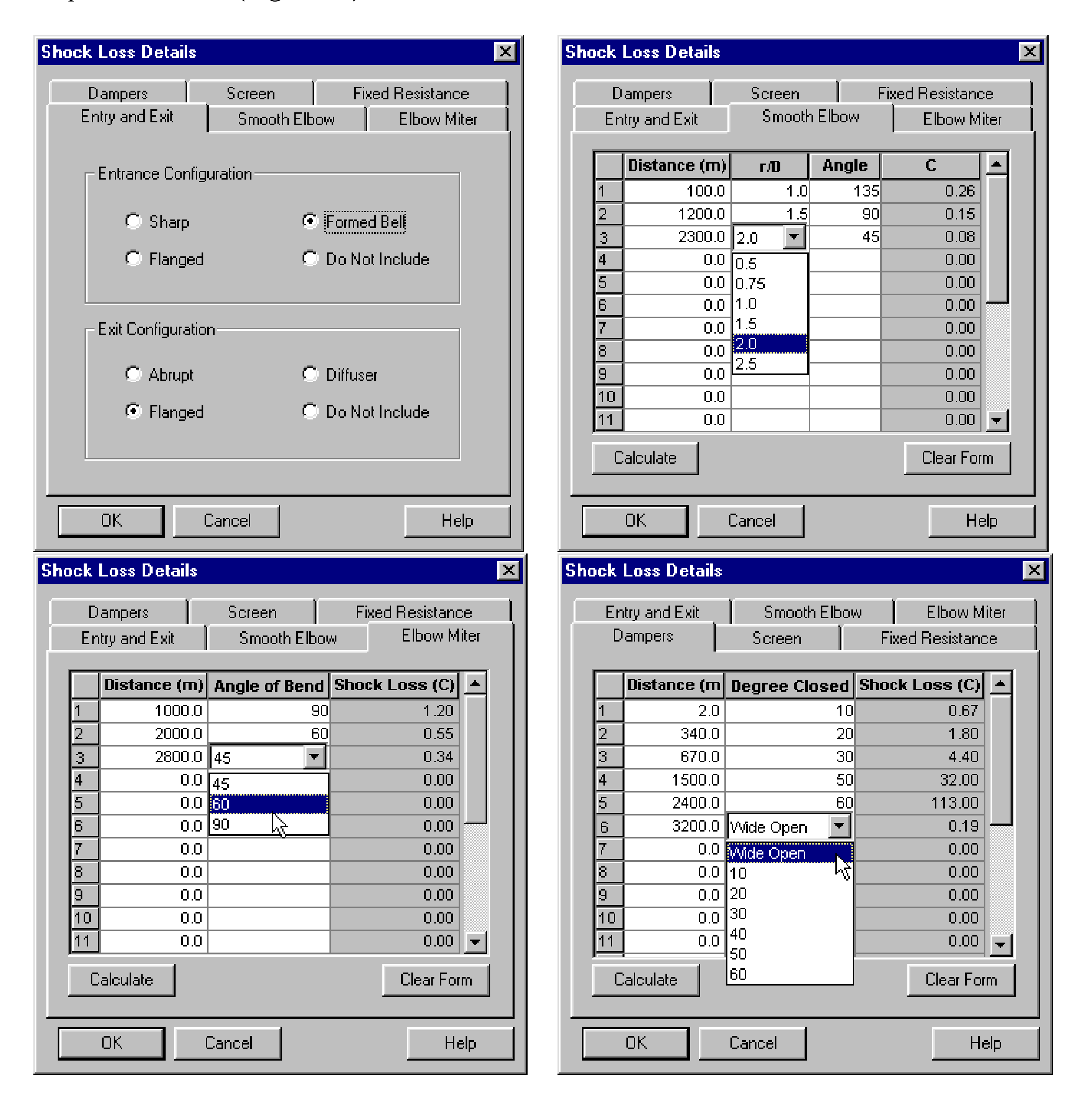
Se debe acatar los siguientes rangos al alimentar datos al programa DuctSIM:

• Diámetro	- 0.1 a 20 m (0.33 a 65.61 ft)
• Longitud	- 10 a 100,000 m (33 a 328000 ft)
• Factor de fricción de Atkinson	- 0 a 1 kg/m^3 (0 a 5390 x10^{-10} lbf min^2/ft^4)
• Resistencia de trayectorias de fuga/100m (100pies)	-100 a 150,000 Ns^2/m^8 (962.5 a 1,443,750 P.U.)
• Densidad de aire	- 0.1 a 2 kg/m^3 (0.00624 a 0.1249 lb/ft^3)

3.3 Detalles de pérdida por choque

Cuando hay obstrucciones dentro de un ducto, el flujo de aire se retarda de dos maneras. Primero, la obstrucción ocasiona una reducción en el área transversal libre, y en segundo lugar el patrón de flujo del aire se interrumpe. Por ejemplo, puede haber una pérdida importante de energía cuando el aire entra a un ducto, debido a que el aire se está acelerando de una condición estancada a la velocidad dentro del ducto. La cantidad de energía perdida depende de la forma de la entrada. De manera similar, cuando el aire fluye a través de un orificio el aire entra desde todas las direcciones por el lado de alta presión, pero se descarga como un chorro en el lado de baja presión. De nuevo, el resultado es una pérdida importante.

El programa DuctSIM permite que se alimente información para incorporar pérdidas por choque en el ducto (Figura 15).



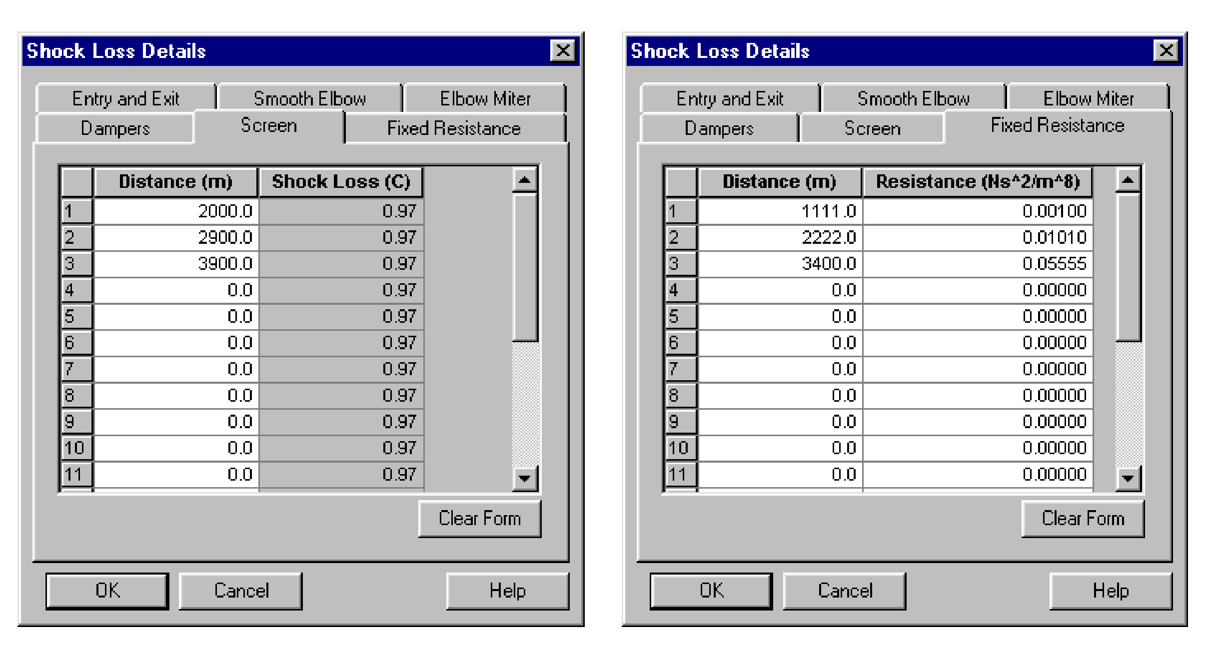


Figura 15: Cuadro de diálogo Datos de pérdida por choque

Estas pérdidas incluyen:

- Pérdidas en entrada - directo, con pestañas o forma de campana
- Pérdidas en salida - abrupto, con pestañas o difusor
- Codo liso - Radio/diámetro: 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
  - Ángulos: 45°, 90°, 135°, 180°
- Codo de inglete - Ángulos: 45°, 60°, 90°
- Amortiguadores - Cerrado a: Totalmente abierto, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°
- Enmallado
- Resistencia fija

El factor de pérdida por choque (C) se determina para cada tipo de obstrucción con base en los datos de accesorios ASHRAE (1989). El usuario puede alimentar hasta 20 casos de cada obstrucción alimentando la longitud a lo largo del ducto en el que se instala el accesorio. Al presionar el botón Calcular (Calculate) aparecerán los resultados de inmediato; sin embargo el programa automáticamente realizará todos los cálculos requeridos una vez que se cierre el cuadro de diálogo. El botón Limpiar Forma (Clean Form) limpia la hoja de alimentación de pérdidas por choque.

Además de estas pérdidas, el usuario también puede seleccionar que el programa automáticamente compute e incluya la pérdida por choque por expansión o contracción relacionada con aire moviéndose entre dos secciones de ducto con áreas disímbolas. La etiqueta para esta herramienta está contenida en la página de Zonas (Zones) (Sección 3.2.3). El programa determina si la transición será una contracción o una expansión, lo que depende del área relativa de las zonas adyacentes y la dirección del flujo de aire (si está inyectando o extrayendo). Se parte del supuesto de que la transición es abrupta. Si el usuario requiere una transición gradual, entonces se debe calcular manualmente la pérdida por choque y alimentarse como una resistencia fija.

3.3.1 Teoría de pérdida por choque

Por lo general se hace referencia a las pérdidas por choque, también llamadas pérdidas dinámicas, en términos de presión de velocidad. Un factor de pérdida por choque, o un coeficiente de pérdida, es el número de presión de velocidad asociado con la pérdida por choque.

Las siguientes fórmulas se usan para evaluar la presión de velocidad (Ecuación 16), la pérdida de presión asociada con la pérdida por choque (Ecuación 17) y la resistencia equivalente de la pérdida por choque (Ecuación 18).

Ecuación 16 – Presión de velocidad: $$p_v = \frac{\rho u^2}{2}$$

Ecuación 17 – Presión de pérdida por choque: $$p_{shock} = C\, p_v$$

Ecuación 18 – Resistencia de pérdida por choque: $$R_{shock} = \frac{p_{shock}}{Q^2} = \frac{C\rho}{2A^2}$$

La Tabla 3 proporciona una lista de los diferentes coeficientes de pérdida por choque incorporados al programa DuctSIM.

Descripción	Ilustración	Condiciones	Coef. Pérdida
Pérdidas en entrada			
Directo	A_{amb} A_{duct}	A_{amb} es infinito	1.00
Con pestaña	A_{amb} A_{duct}		0.50
En forma de campana	A_{amb} A_{duct}		0.10
Pérdidas en salida			
Abrupta	A_{amb} A_{duct}	A_{amb} es infinito	1.00
Con pestaña	A_{amb} A_{duct}		0.88
Difusor	A_{amb} A_{duct}		0.51

Codo liso			
45 Grados	θ	r/D	
	45	0.50	0.40
		0.75	0.20
		1.00	0.13
		1.50	0.09
		2.00	0.08
		2.50	0.08
90 Grados	θ	r/D	
	90	0.50	0.71
		0.75	0.33
		1.00	0.22
		1.50	0.15
		2.00	0.13
		2.50	0.12
135 Grados	θ	r/D	
	135	0.50	0.85
		0.75	0.40
		1.00	0.26
		1.50	0.18
		2.00	0.16
		2.50	0.14
180 Grados	θ	r/D	
	180	0.50	0.99
		0.75	0.46
		1.00	0.31
		1.50	0.21
		2.00	0.18
		2.50	0.16
Codo de inglete	θ		
	45		0.34
	60		0.55
	90		1.20

Amortiguador (con el mismo diámetro que el ducto)		θ Abierto 10 20 30 40 50 60	 0.19 0.67 1.80 4.40 11.0 32.0 113
Malla		Proporción de área libre de malla = 0.6 Diámetro de malla = Diámetro de ducto	0.97
Expansión abrupta		$C_2 = \left[\frac{A_2}{A_1} - 1\right]^2$	
Contracción abrupta		$C_2 = 0.5\left[1 - \frac{A_2}{A_1}\right]^2$	

Tabla 3: Coeficientes de pérdida por choque incorporados en el Programa DuctSIM (conforme a ASHRAE, 1989)

Se debe usar la herramienta de alimentación de resistencia fija si una pérdida por choque en particular no está incluida en la tabla, o si la pérdida es diferente a la indicada. Un ejemplo de esto podría ser la inclusión de una malla que tiene una proporción de área libre que no sea de 0.6, o un amortiguador de mariposa que tenga un diámetro menor al del ducto. En casos como este, se recomienda al usuario calcular manualmente una resistencia de pérdida por choque a partir de una referencia adecuada (como ASHRAE, 1989) y alimentarlo directamente en la página de resistencia fija.

3.4 Ventiladores

3.4.1 Detalles generales

Los ventiladores para aplicaciones en minería y túneles se pueden dividir en dos categorías amplias: centrífugos o de flujo axial. El flujo a través del ventilador centrífugo es principalmente radial en la región de transferencia de energía. El impulsor del ventilador se parece a una rueda de paletas, entrando el aire cerca del centro de la rueda. Los ventiladores centrífugos pueden tener un diseño de aspas radiales, curveadas hacia atrás o curveadas hacia delante. Las eficiencias más altas por lo general se relacionan con las aspas curveadas hacia atrás, que por lo general proporcionan la presión de operación más grande para un tamaño de rotor dado.

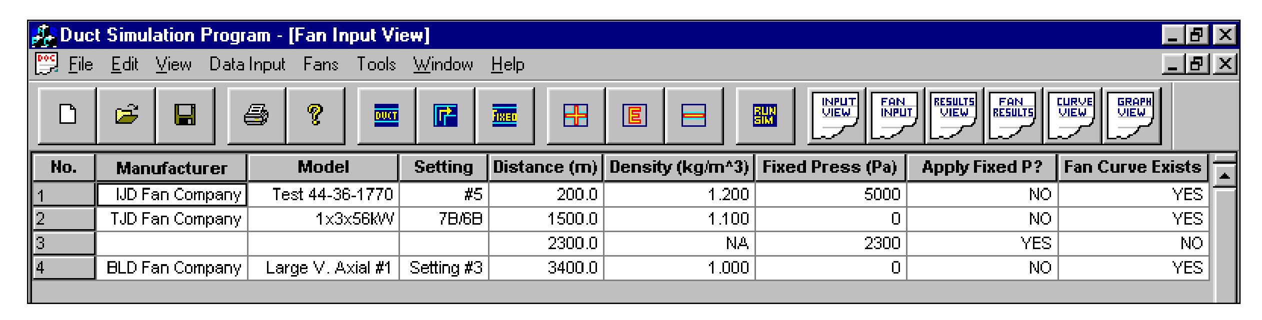
Un ventilador axial de aspas (flujo axial) sigue el mismo principio que el propulsor de un avión. La dirección del flujo a través del ventilador axial de aspas va principalmente paralelo al eje de rotación, idealmente con muy poco o ningún componente de velocidad en la dirección radial. Los ventiladores axiales por lo general rotan a una velocidad de punta del aspa más alta que los ventiladores centrífugos con desempeño similar y por tanto con frecuencia son más ruidosos. Estos ventiladores también sufren de una definitiva característica de atascado a una resistencia alta, que no es el caso con los ventiladores centrífugos. Sin embargo, los ventiladores axiales de aspas son más compactos, y se pueden diseñar para ser reversibles. Los ventiladores axiales de aspas por lo general son los ventiladores elegidos para instalaciones de ductos auxiliares. Son ligeros y se pueden montar en línea con el ducto con poca o ninguna obstrucción adicional.

3.4.1.1 Guía de instalación de ventilador auxiliar

La Tabla 4 muestra usa serie de instalaciones de ventilador auxiliar típicas, e identifica la configuración correcta e incorrecta para cada caso. Esta tabla se debe usar para ayudar a optimizar y planear la instalación de ventiladores axiales de aspas en sistemas de ductos.

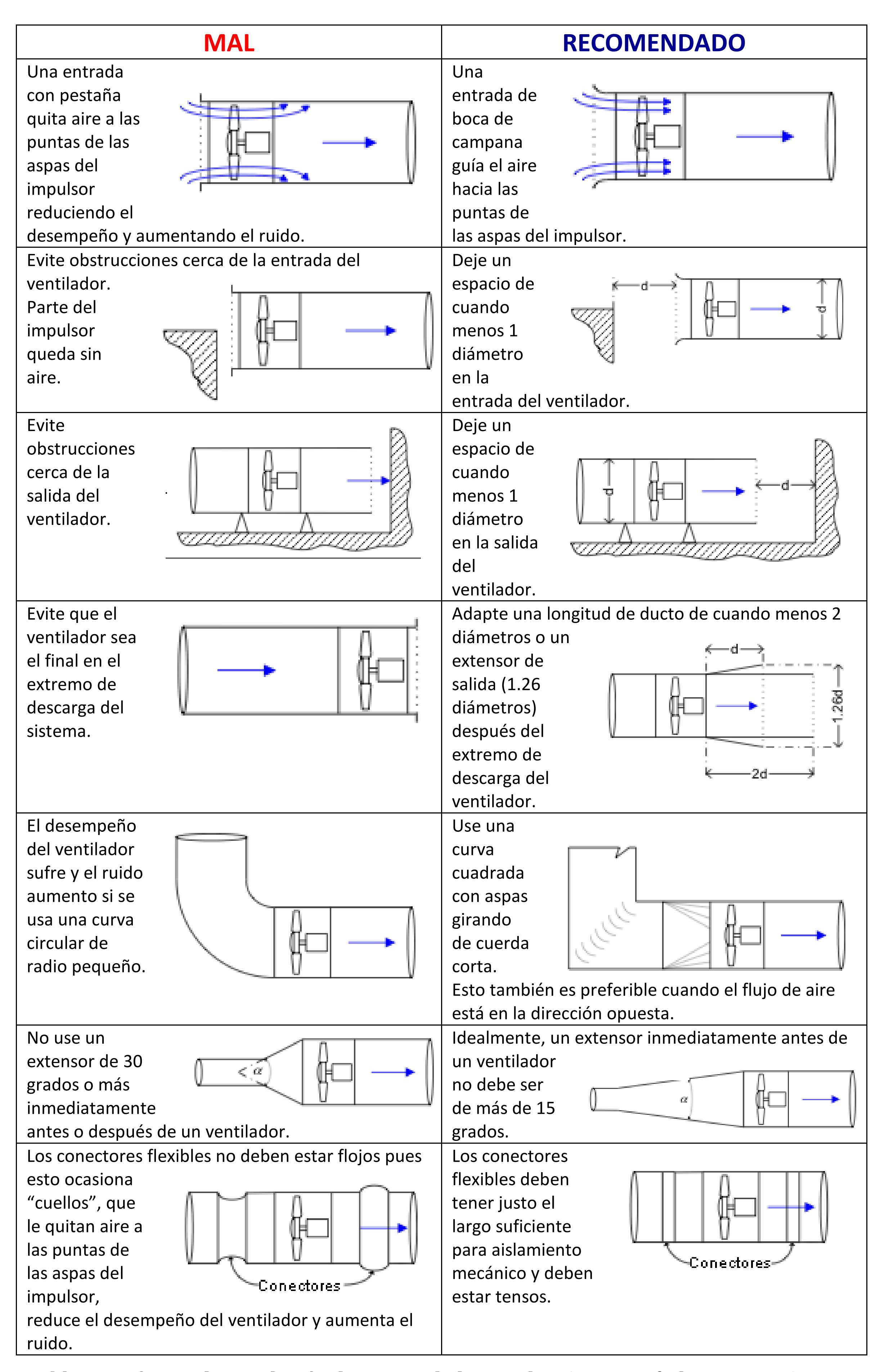
3.4.2 Alimentación de ventiladores en el programa DuctSIM

El usuario puede asignar ventiladores al proyecto desde cualquier vista. Se puede añadir, editar o suprimir un ventilador del ducto seleccionando la opción correspondiente en el menú Ventiladores (Fans), o presionando los botones “+”, “-” o “E” que corresponden a añadir ventilador, quitar ventilador o editar ventilador. La información del ventilador se puede resumir y ver en la Vista Alimentación de Ventilador (Fan Input View), que contiene una lista tabular de todos los ventiladores. En la Figura 16 se muestra un ejemplo de la Vista Alimentación de Ventilador. Se proporciona un resumen de los principales detalles del ventilador, incluyendo el fabricante, modelo, ajuste, distancia a lo largo de la curva, densidad de aire para cada curva de ventilador, presión de ventilador fija (si aplica) y etiquetas indicando si se está aplicando una presión fija y si el usuario ha agregado una curva para el ventilador. DuctSIM proporciona una rutina para ordenar los ventiladores en la Vista Alimentación de Ventilador. Esto permite al usuario ordenar los ventiladores conforme aumente la distancia, y se activa seleccionando Ordenar Ventiladores (Sort Fans) en el menú de Herramientas (Tools).



No.	Manufacturer	Model	Setting	Distance (m)	Density (kg/m^3)	Fixed Press (Pa)	Apply Fixed P?	Fan Curve Exists
1	IJD Fan Company	Test 44-36-1770	#5	200.0	1.200	5000	NO	YES
2	TJD Fan Company	1x3x56kW	7B/6B	1500.0	1.100	0	NO	YES
3				2300.0	NA	2300	YES	NO
4	BLD Fan Company	Large V. Axial #1	Setting #3	3400.0	1.000	0	NO	YES

Figura 16: Vista Alimentación de Ventilador



MAL	RECOMENDADO
Una entrada con pestaña quita aire a las puntas de las aspas del impulsor reduciendo el desempeño y aumentando el ruido.	Una entrada de boca de campana guía el aire hacia las puntas de las aspas del impulsor.
Evite obstrucciones cerca de la entrada del ventilador. Parte del impulsor queda sin aire.	Deje un espacio de cuando menos 1 diámetro en la entrada del ventilador.
Evite obstrucciones cerca de la salida del ventilador.	Deje un espacio de cuando menos 1 diámetro en la salida del ventilador.
Evite que el ventilador sea el final en el extremo de descarga del sistema.	Adapte una longitud de ducto de cuando menos 2 diámetros o un extensor de salida (1.26 diámetros) después del extremo de descarga del ventilador.
El desempeño del ventilador sufre y el ruido aumento si se usa una curva circular de radio pequeño.	Use una curva cuadrada con aspas girando de cuerda corta. Esto también es preferible cuando el flujo de aire está en la dirección opuesta.
No use un extensor de 30 grados o más inmediatamente antes o después de un ventilador.	Idealmente, un extensor inmediatamente antes de un ventilador no debe ser de más de 15 grados.
Los conectores flexibles no deben estar flojos pues esto ocasiona “cuellos”, que le quitan aire a las puntas de las aspas del impulsor, reduce el desempeño del ventilador y aumenta el ruido.	Los conectores flexibles deben tener justo el largo suficiente para aislamiento mecánico y deben estar tensos.

Tabla 4: Guía para la instalación de un ventilador auxiliar (JM Aerofoil Fans, 1999)

Cuando el usuario selecciona añadir un nuevo ventilador o decide editar un ventilador existente, aparece el cuadro de diálogo Añadir Ventilador (Add Fan) (ver Figura 17).

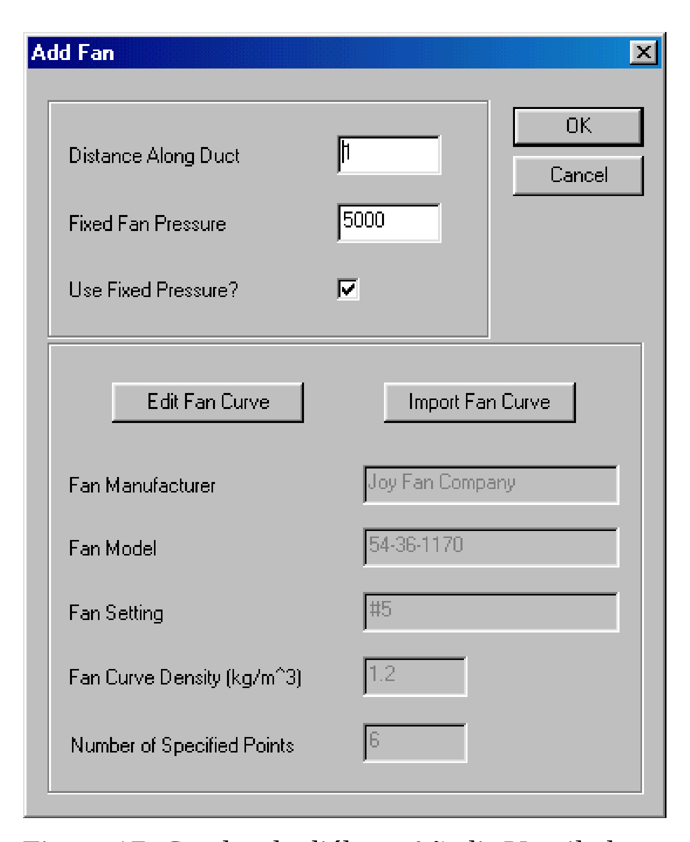


Figura 17: Cuadro de diálogo Añadir Ventilador

Este cuadro de diálogo pide al usuario que introduzca la siguiente información:

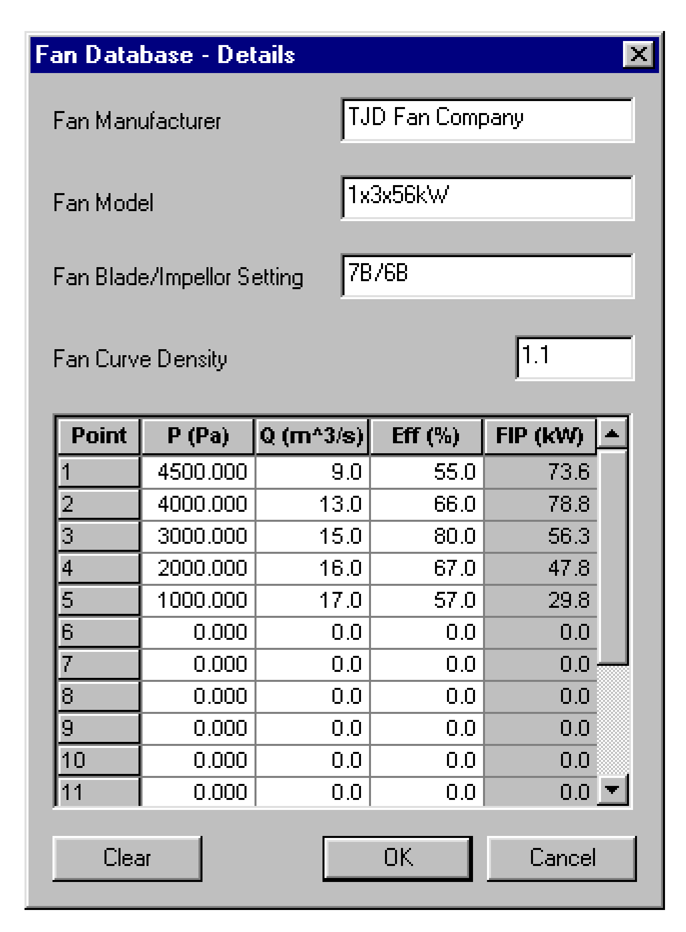
- Distancia a lo largo del ducto medida desde el lado que no es de la cara
- Una presión de ventilador fija (opcional)
- Una curva de ventilador (opcional)
- Si se ha introducido una curva de ventilador, entonces aparecerán el fabricante, modelo, ajuste de aspas, densidad de curva del ventilador y el número de puntos de la curva del ventilador.

El usuario puede alimentar una curva de ventilador directamente presionando el botón Editar Curva de Ventilador (Edit Fan Curve) o puede importar una curva de una base de datos de ventiladores usando el botón Importar Curva de Ventilador (Import Fan Curve). Si el usuario marca usar la presión fija, entonces se debe alimentar un valor en la celda de presión fija. De manera similar, si el usuario no marca usar la presión fija, entonces se debe incluir una curva de ventilador.

3.4.3 Curvas de ventilador

Si el usuario elige alimentar una curva de ventilador, aparece el cuadro que se muestra en la Figura 18. El usuario tiene la opción de alimentar datos descriptivos de:

- Fabricante del ventilador
- Modelo de ventilador
- Ajuste de aspas de ventilador



Point	P (Pa)	Q (m^3/s)	Eff (%)	FIP (kW)
1	4500.000	9.0	55.0	73.6
2	4000.000	13.0	66.0	78.8
3	3000.000	15.0	80.0	56.3
4	2000.000	16.0	67.0	47.8
5	1000.000	17.0	57.0	29.8
6	0.000	0.0	0.0	0.0
7	0.000	0.0	0.0	0.0
8	0.000	0.0	0.0	0.0
9	0.000	0.0	0.0	0.0
10	0.000	0.0	0.0	0.0
11	0.000	0.0	0.0	0.0

Figura 18: Cuadro de dialogo de Curva de Ventilador

El usuario debe introducir la densidad del aire, que representa la densidad a la cual se desarrolló la curva (por lo general a la densidad de aire estándar = 1.2 kg/m^3 [0.075 lb/ft^3]). La curva de características de ventilador se debe alimentar entonces. Observar las siguientes reglas para alimentar información sobre la curva de ventilador:

- Alimentar cuando menos dos puntos de datos y menos de 15.
- Alimentar datos de presión y cantidad para cada punto. Si se cuenta con ellos, añadir también los datos de eficiencia. Si no se incluyen los datos de eficiencia, los cálculos y resultados de energía del ventilador se desactivarán.
- Todos los valores de presión se deben alimentar como presión total de ventilador (ver la Sección 3.4.3.2).
- Los puntos se deben elegir de manera que representen de manera adecuada toda la extensión de la curva.
- El usuario puede introducir los puntos en cualquier orden. El programa ordenará los datos automáticamente y los validará cuando se cierre el cuadro de diálogo. Cuando el usuario vuelva a ver la curva aparecerá en orden de presión descendente/cantidad ascendente.

Una curva de ventilador es una descripción gráfica de las características de presión-cantidad asociadas a un cierto ventilador y configuración. Estas características de presión-cantidad

variarán dependiendo de varios factores. En los ventiladores axiales de aspas se puede ajustar el ángulo de las aspas del ventilador, o se puede cambiar la velocidad de rotación de las aspas. En los ventiladores centrífugos, que tienen un impulsor fijo, las características se pueden cambiar ajustando la velocidad de rotación del impulsor, o ajustando la trayectoria del flujo que toma el ventilador al entrar al impulsor (controladores de aspas a la entrada).

La Figura 19 muestra un juego de ejemplos de curvas para un ventilador axial de aspas. Este ventilador tiene tres distintos ajustes de aspas llamados #1, #2 y #3. Se proporciona la presión total del ventilador en el eje ***y*** primario, y la potencia al freno del ventilador en el eje ***y*** secundario. La cantidad del ventilador está en el eje ***x***. Se muestra relación llamada resistencia equivalente del sistema o del ducto, que traza la pérdida de presión contra la cantidad para la resistencia de ducto equivalente que "ve" el ventilador. Esta tendencia se evalúa a partir de la Ley (Ecuación 5). Esta curva de resistencia del ducto intercepta la curva de ventilador en el punto de operación del ventilador. La presión y cantidad totales se leen directamente desde este punto. La potencia al freno del ventilador se obtiene haciendo bajar una línea de la curva de presión-cantidad. La potencia al freno del ventilador se lee entonces en el eje ***y*** secundario como se muestra en la Figura 19.

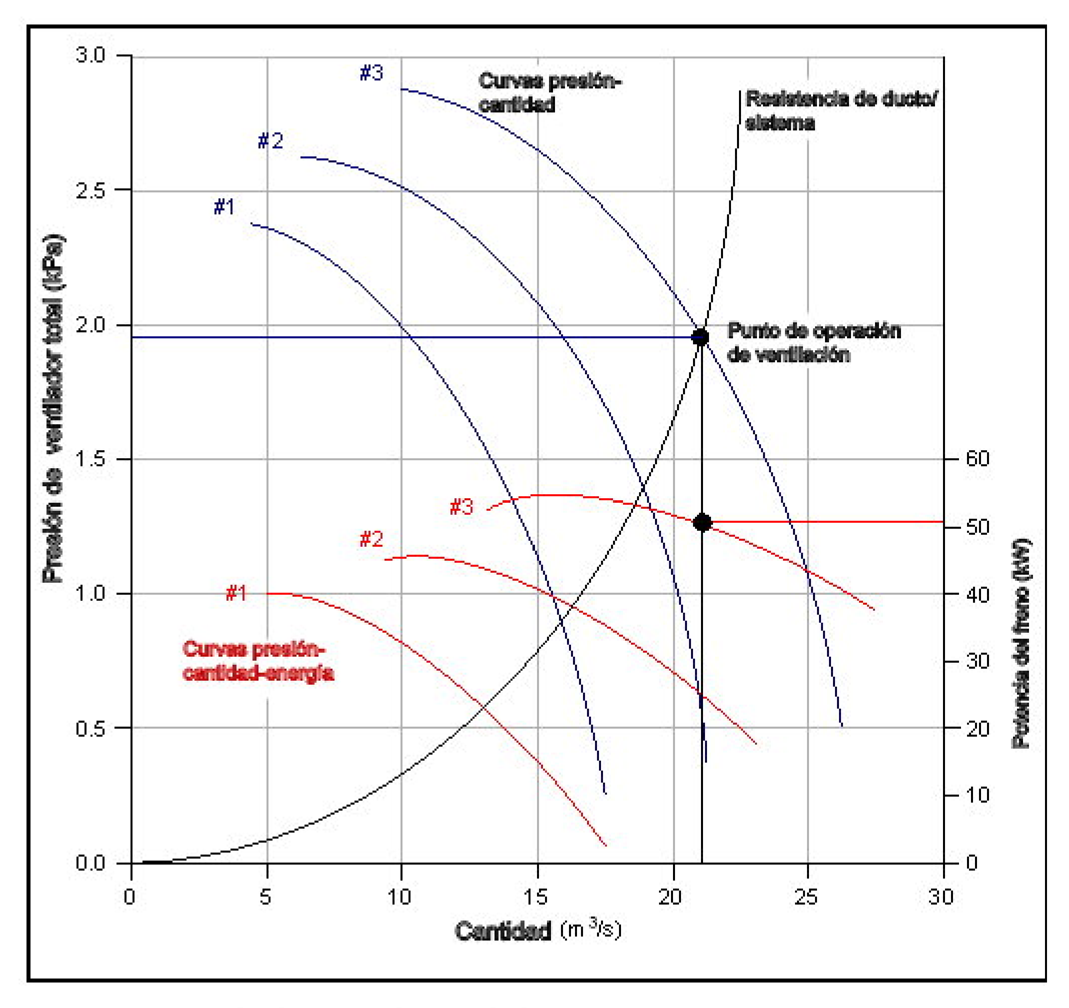


Figura 19: Ejemplo de curva de ventilador

Al resolver las curvas de ventilador, el programa DuctSIM parte del supuesto de una relación lineal entre dos puntos cualquiera en la curva del ventilador. Si el punto de operación está a la

izquierda de la curva definida por el usuario, entonces se supone una presión constante a la presión pico (alimentada por el usuario). Si el punto de operación está a la derecha de la curva definida por el usuario, se da entonces una interpolación de la curva con base en la pendiente de los dos últimos puntos (incluso en el cuadrante de presión negativa).

La Figura 20 ilustra la selección de puntos para DuctSIM. En este caso se han trazado 8 puntos de características en la curva de ventilador roja. El programa DuctSIM aplicará líneas rectas entre cada uno de estos 8 puntos como se muestran con las líneas negras. En la parte superior de la curva (lado izquierdo) la interpolación está a una presión constante con base en el punto 1. En la parte inferior de la curva (derecha) la interpolación se basa en la pendiente de los últimos puntos, que son 7 y 8. El área sombreada representa la región formada por las presiones y cantidades mínimas y máximas para los puntos 1 a 8. Cualquier punto de operación que caiga en este rango se considera que está "en" la curva.

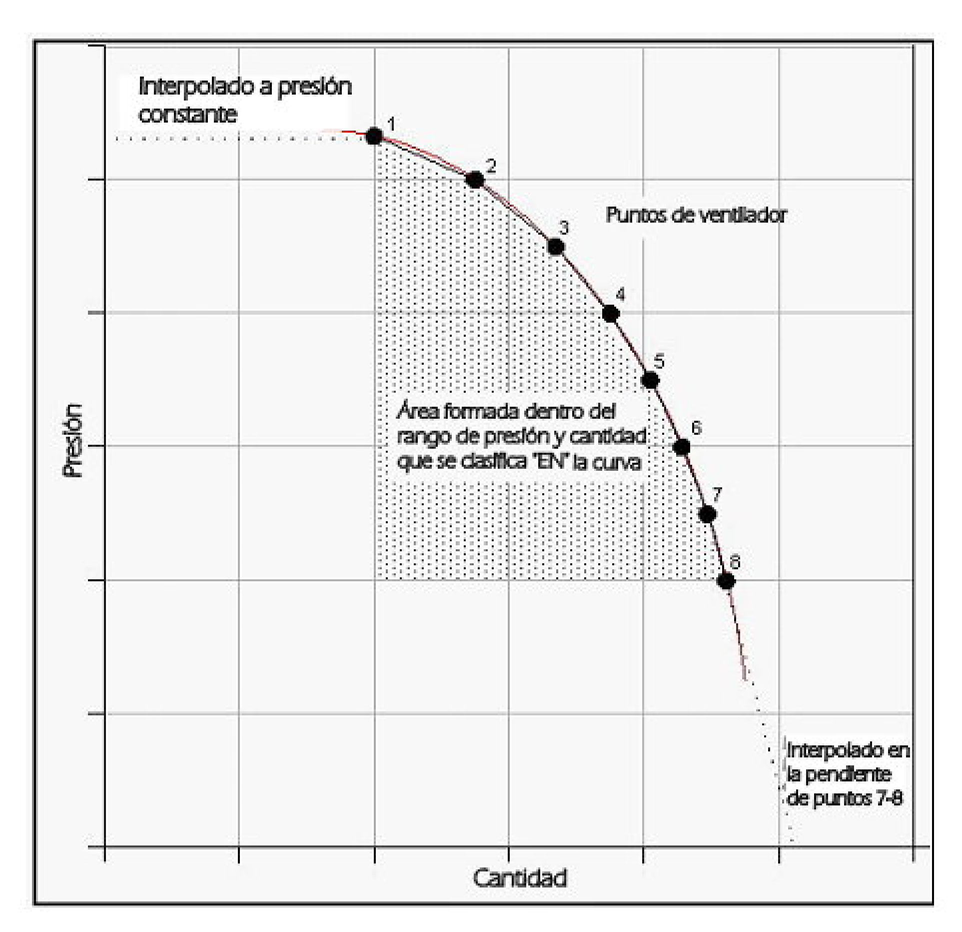


Figura 20: Curva de ventilador mostrando selección de puntos e interpolación

3.4.3.1 Atascamiento del ventilador

El atascamiento aerodinámico ocurre con ventiladores de aspas axiales cuando el ángulo de ataque de las aspas del ventilador es más grande que el ángulo de elevación máxima, lo que ocasiona que se rompa la capa frontera (aire) en la superficie superior de las aspas del ventilador. El resultado final es una pérdida de elevación y arrastre adicional. Por lo general se requiere un aumento en la resistencia del sistema para forzar un ventilador a que vuelva a

su modo de operación, en el que la resistencia alcanza un valor crítico después del cual el ventilador está funcionando más allá de su rango de operación normal. Cuando un ventilador esté funcionando bajo condiciones de atascamiento empezará a vibrar en exceso y a producir ruido a baja frecuencia. Este ruido con frecuencia es obvio; sin embargo, si un ventilador pasa lentamente a la zona de atascamiento entonces tal vez no se reconozca una transición abrupta. Nunca se debe dejar funcionar un ventilador continuamente en estas condiciones, pues puede ocasionar que fallen las aspas, además de desgaste excesivo de otros componentes. Esta situación representa problemas potenciales tanto de seguridad como de mantenimiento.

En aplicaciones a gran escala, es común que se coloquen controles en los ventiladores de la mina para alertar al personal cuando la presión de operación del ventilador se eleve por arriba de cierto punto. En esta momento el personal tiene que bajar la resistencia del sistema, o ajustar la curva del ventilador (cambiar el ángulo de las aspas o, si la tiene, la velocidad del ventilador). Para los ventiladores auxiliares más pequeños por lo general no se requiere este grado de monitoreo, y el punto de operación pico por lo general está predeterminado bajo la forma de una longitud máxima de ducto-línea adherida al ventilador. Se trata entonces de desarrollar e implementar procedimientos para asegurar que el ventilador nunca tenga que operar con un ducto que exceda la longitud máxima. Además de la longitud del ducto, hay otros factores que se deben considerar en las instalaciones de ductos auxiliares. Estos factores incluyen el diámetro y tipo de ducto (flexible o rígido), las condiciones del ducto, y las pérdidas por choque relacionadas con la instalación (curvas, expansión, contracción, etc.). Por tanto, es también importante que se adopte un plan consistente respecto al tipo y diámetro de ducto, y la configuración general del sistema de ventilación auxiliar para reducir al mínimo las pérdidas en las curvas.

3.4.3.2 Gradientes de presión

El programa DuctSIM requiere que las curvas de ventilador se alimenten en términos de presión total, donde:

Ecuación 19 – Presión total: $$\textbf{Presión total} = \textbf{Presión estática} + \textbf{Presión de velocidad}$$

La presión de velocidad es la energía cinética aplicada al movimiento del aire a través del ducto. La presión estática no está relacionada con el movimiento del aire, y ejerce una fuerza en todas las direcciones, muy parecido a la presión del aire dentro de un globo. La Figura 21 muestra un ejemplo de los perfiles de presión existentes a lo largo de un ducto. En este caso

el ducto tiene un solo ventilador, con una transición entre dos diferentes tamaños de ducto.

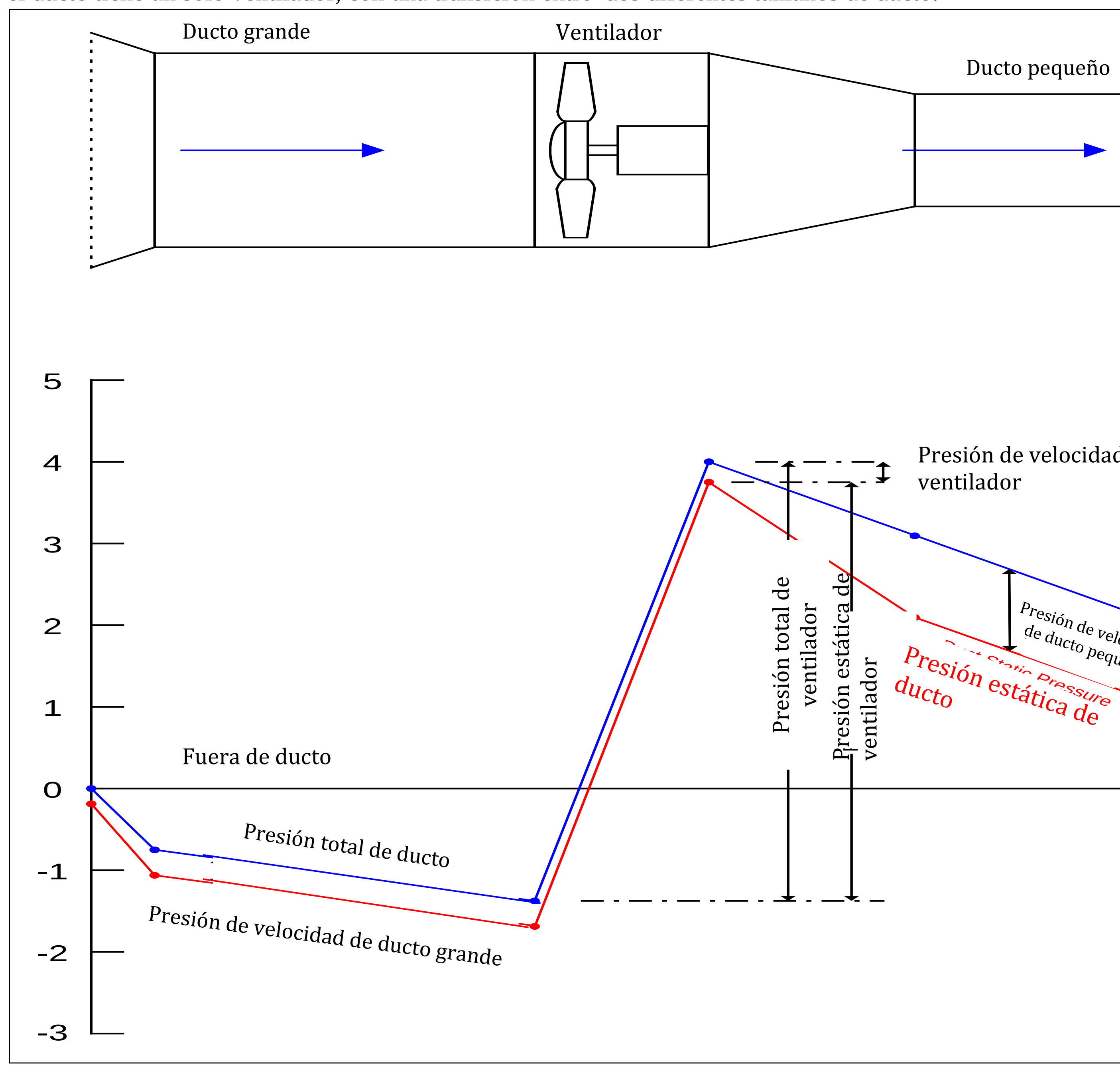


Figura 21: Perfiles de presión típicos a lo largo de un ducto

Las relaciones de las presiones del ducto con el perfil trazado son las siguientes:

1. La presión total del ducto siempre es cero (con respecto al datum – lo que rodea a la galería) en la entrada del ducto. La presión estática del ducto en la entrada siempre es negativa en la entrada y es igual a la presión de velocidad del ducto en ese punto.
2. La presión total del ducto siempre es positiva en la descarga a la atmósfera y es igual a la presión de velocidad del ducto en ese punto. La presión estática del ducto en la descarga siempre es cero.
3. La presión total de ventilador es la diferencia en la presión total del ducto a través del ventilador.
4. La presión estática del ventilador es la diferencia entre la presión total del ducto en la entrada y la presión estática del ducto en la salida. Por tanto, la presión de velocidad del ventilador se toma en el lado exterior del ventilador.

3.4.4 Leyes de ventilador

Al seleccionar un ventilador, se debe tener cuidado de convertir correctamente entre presión total del ventilador y presión estática del ventilador. Algunas curvas de fabricantes se proporcionan como presión total, en tanto que otras proporcionan la presión estática y requieren que se calcule la presión de velocidad del ventilador para tomar en cuenta correctamente cualquier accesorio relacionado con el ventilador.

Las Leyes de ventilador son una versión particular de las leyes de similitud generales que aplican a todas las clases de turbo maquinaria. Expresan las relaciones de diferentes variables de desempeño, incluyendo:

1. Tamaño del impulsor del ventilador – d (m [ft])
2. Velocidad del ventilador – N (rpm)
3. Densidad de aire del ventilador – ρ (kg/m^3 [lb/ft^3])
4. Tasa de flujo del ventilador – Q (m^3/s [cfm])
5. Presión total del ventilador – p (Pa [in.w.g.)
6. Energía de aire del ventilador – P_{ow} (W [hp])

En el uso práctico o diseño de ventiladores por lo general tenemos interés en variar solo una de las variables independientes de velocidad, densidad de aire o tamaño de impulsor a la vez. Las leyes de ventilador se pueden resumir por tanto de la siguiente manera:

Velocidad del ventilador (N)	Diámetro del impulsor (d)	Densidad de aire (ρ)
$P \propto N^2$	$p \propto d^2$	$P \propto \rho$
$Q \propto N$	$Q \propto d^3$	Q fixed
$P_{ow} \propto N^3$	$P_{ow} \propto d^5$	$P_{ow} \propto \rho$

Tabla 5: Leyes de ventilador

En el programa DuctSIM se hace una corrección para la diferencia entre la densidad del aire del ducto real en la que está operando el ventilador, y la densidad del aire para la cual se desarrolló la curva de ventilador. Debido a que la cantidad es independiente de la presión, y la presión es directamente proporcional a la presión, se usa la siguiente fórmula para corregir las presiones de ventilador:

Ecuación 20 – Ajuste de presión de ventilador: $$P_a = P_s \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

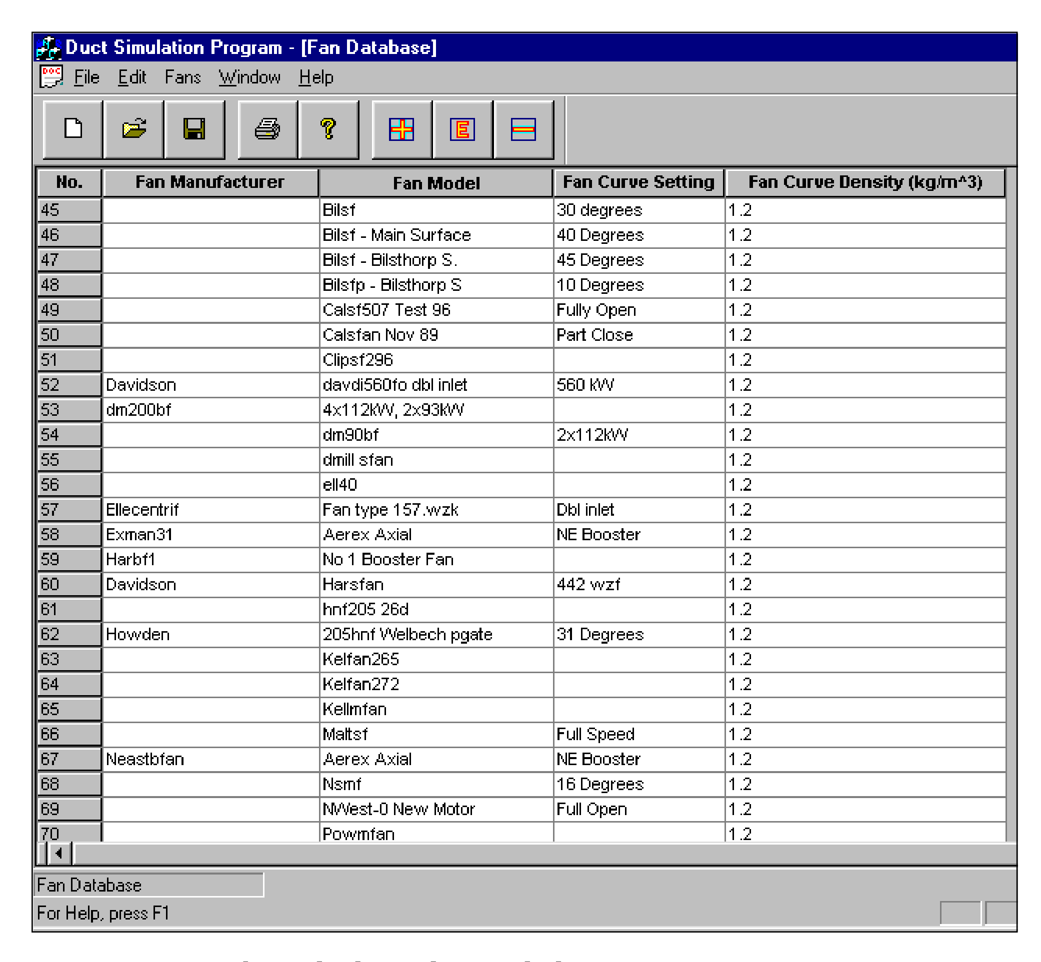
Por tanto, conforme aumenta la densidad del aire del ducto aumenta la presión del ventilador requerida para mover el mismo volumen de aire. Esto es lógico, pues una unidad volumen de aire será más pesada, requiriendo que el ventilador trabaje más para moverla.

3.4.5 Base de datos de ventilador

DuctSIM incorpora una herramienta de archivo datos para el desarrollo, manipulación y almacenamiento de curvas de ventilador, llamada la base de datos de ventilador. La base de datos de ventilador permite al usuario generar diferentes archivos de ventilador, cada uno de los cuales puede guardar muchas curvas diferentes. Por tanto, el usuario puede elegir tener un solo archivo de base de datos para todos los ventiladores, o tener un archivo de base de datos por separado para cada ventilador, tal vez guardando los diferentes ajustes a la curva.

Se tiene acceso a la base de datos de ventilador directamente desde DuctSIM seleccionando Archivo/Abrir (File/Open) y eligiendo el archivo de base de datos de ventilador (extensión *.fdb). El usuario puede desarrollar un nuevo archivo de base de datos de ventilador seleccionando Archivo/Nuevo (File/New) y eligiendo Archivo de Ventilador (Fan File) como el nuevo tipo de archivo (no DuctSIM).

En la Figura 22 se muestra un ejemplo de la Vista Base de Datos de Ventilador (Fan Database view). El usuario puede añadir, editar o quitar ventiladores de un archivo de base de datos en particular usando ya sea el menú Ventiladores (Fans), o los botones en la barra de herramientas (“+”, “E” y “-”). Al añadir o editar ventiladores aparece el cuadro de diálogo que se muestra en la Figura 17. Al añadirse ventiladores los puntos de presión y cantidad se ordenan y validad (para asegurar que los datos sean lógicos).



No.	Fan Manufacturer	Fan Model	Fan Curve Setting	Fan Curve Density (kg/m^3)
45		Bilsf	30 degrees	1.2
46		Bilsf - Main Surface	40 Degrees	1.2
47		Bilsf - Bilsthorp S.	45 Degrees	1.2
48		Bilsfp - Bilsthorp S	10 Degrees	1.2
49		Calsf507 Test 96	Fully Open	1.2
50		Calsfan Nov 89	Part Close	1.2
51		Clipsf296		1.2
52	Davidson	davdi560fo dbl inlet	560 kW	1.2
53	dm200bf	4x112kW, 2x93kW		1.2
54		dm90bf	2x112kW	1.2
55		dmill sfan		1.2
56		ell40		1.2
57	Ellecentrif	Fan type 157.wzk	Dbl inlet	1.2
58	Exman31	Aerex Axial	NE Booster	1.2
59	Harbf1	No 1 Booster Fan		1.2
60	Davidson	Harsfan	442 wzf	1.2
61		hnf205 26d		1.2
62	Howden	205hnf Welbech pgate	31 Degrees	1.2
63		Kelfan265		1.2
64		Kelfan272		1.2
65		Kellmfan		1.2
66		Maltsf	Full Speed	1.2
67	Neastbfan	Aerex Axial	NE Booster	1.2
68		Nsmf	16 Degrees	1.2
69		NWest-0 New Motor	Full Open	1.2
70		Powmfan		1.2

Figura 22: Vista base de datos de ventilador

Es importante entender la diferencia entre ventiladores guardados en los archivos de la base de datos de ventilador y los archivos DuctSIM. El archivo DuctSIM guarda la información sobre el ventilador de todos los ventiladores que se han asignado a un ducto en particular. El archivo de base de datos de ventilador es una fuente desde la que el usuario puede sacar datos de ventiladores para añadirlos a cualquier proyecto en DuctSIM. Se añade una curva de características de ventilador específica al proyecto DuctSIM al seleccionar Importar Curva de Ventilador (Import Fan Curve), como se muestra en la Figura 17. En este punto el usuario puede buscar en los archivos de base de datos de ventilador (localmente o en una red). Cuando se selecciona un archivo de base de datos de ventilador aparece el cuadro de diálogo Seleccionar Ventilador (Select Fan) (Figura 23), que muestra todas las curvas de ventilador contenidas en esa base de datos. El usuario puede entonces seleccionar un ventilador para añadirlo al proyecto.

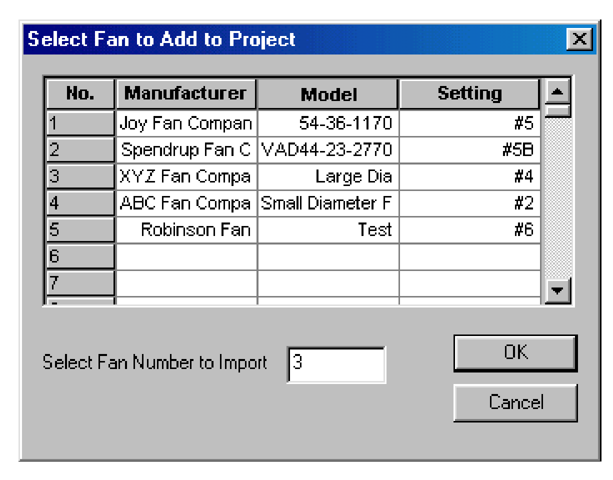


Figura 23: Cuadro de diálogo para seleccionar un ventilador para añadir al proyecto

3.4.6 Ventiladores de presión fija

El usuario puede seleccionar no usar una curva de ventilador e introducir una presión fija para uno o más ventiladores en el ducto. Esto asignará una presión de operación específica al ventilador que no cambiará, aunque se ajuste la resistencia del ducto. Los ventiladores de presión fija con frecuencia se usan cuando el usuario ha tomado medidas en un ducto y está tratando de simular ese ducto usando el programa. En este caso puede ser útil fijar la presión del ventilador a las presiones medidas, y después examinar los flujos de aire predichos y medidos para evaluar la exactitud del modelo. Otro uso para los ventiladores de presión fija es al principio del diseño del sistema de ductos, antes de seleccionar el ventilador más adecuado, cuando la opción de presión fija se usa para ayudar a estimar el tamaño aproximado de los ventiladores y el espacio entre sí (usualmente por iteración).

Si se usa la opción de presión fija se omitirán todos los datos de eficiencia de la simulación, y no se proporcionarán los valores de energía de entrada del ventilador. Los datos de eficiencia solo se incluyen cuando las curvas de ventilador se usan en el modelo.

3.5 Vista alimentación

La información alimentada para describir el ducto y el (los) ventilador(es) se resume en la Vista Alimentación (Input View). Esta vista se muestra en la Figura 24. Se proporcionan los siguientes datos:

- Datos físicos – Diámetro y longitud del ducto.
- Datos de ventilador – Número total de ventiladores, número de ventiladores operando en una curva, el número de ventiladores de presión fija y si el ducto inyecta o extrae aire.
- Datos de resistencia – Factor de fricción de Atkinson, número de trayectorias de fuga (preestablecido en 99) y la resistencia de las trayectorias de fuga por 100 m de ducto.
- Punto de inicio, punto de fin, diámetro, factor de fricción de Atkinson y resistencia de trayectorias de fuga para todas las zonas asignadas en el proyecto.

Después de alimentar los diferentes parámetros, se aconseja al usuario examinar con cuidado la Vista Alimentación para asegurarse de que todos los datos sean lógicos.

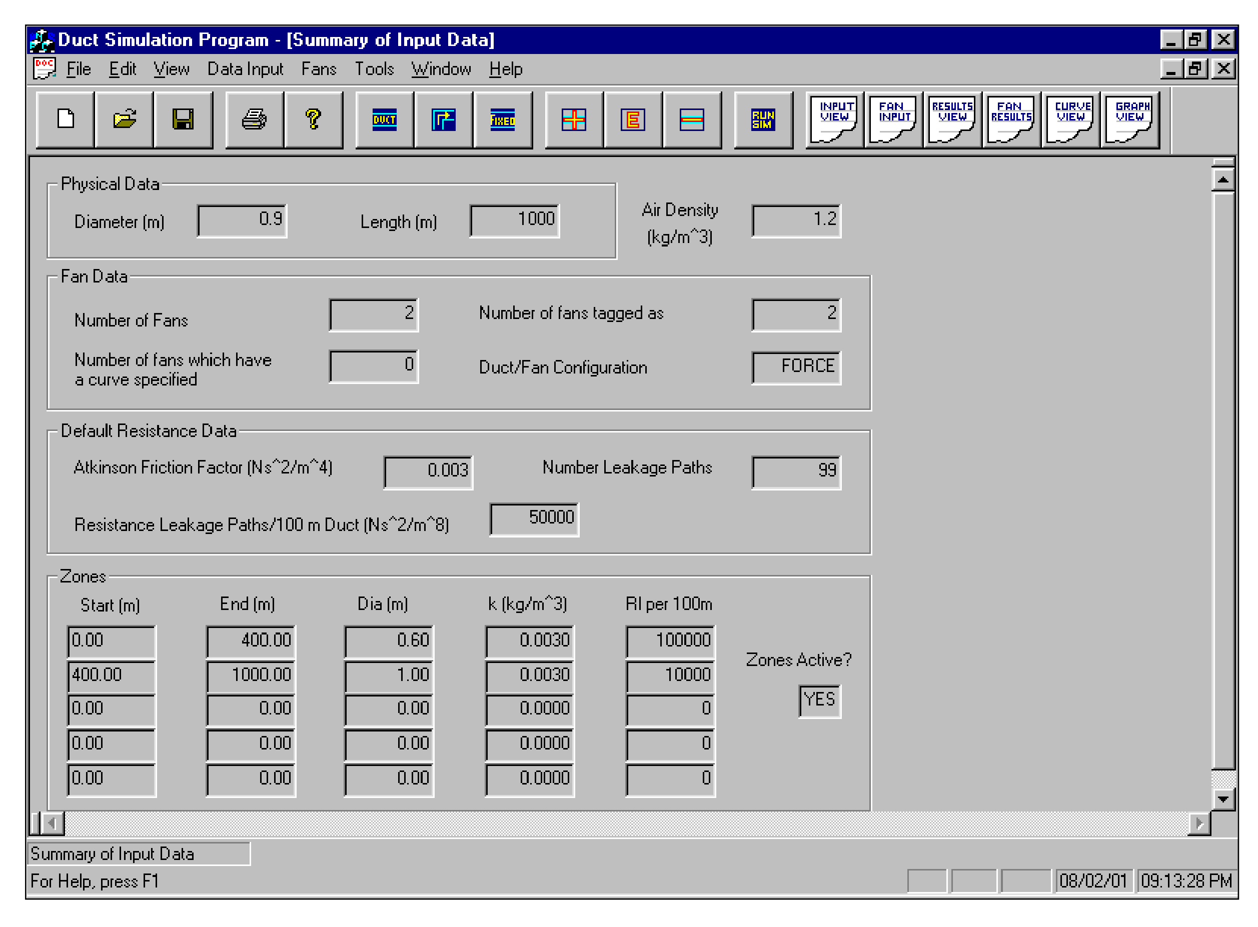


Figura 24: Vista alimentación

3.6 Herramienta de cantidad fija

DuctSIM contiene una herramienta llamada Herramienta de Cantidad Fija (Fixed Quantity Tool). Esta herramienta permite al usuario realizar los siguientes cálculos:

1. Determinar la presión y cantidad totales del ventilador para una necesidad específica de flujo de aire en el frente de trabajo.
2. Determinar el flujo del frente y la presión total de ventilador para una cantidad de ventilador específica.

En ambos casos se parte del supuesto de que el ventilador está lejos del frente (en el otro extremo del ducto, conforme a la Figura 10). Además, se ignora a todos los ventiladores si el usuario decide usar esta herramienta. DuctSIM usa el Método en serie-paralelo para resolver el problema de la cantidad fija, en vez de la Técnica iterativa de Hardy Cross que se usa cuando hay ventiladores presentes (ver la Sección 3.2.2). Los ventiladores se retiran de la simulación debido al potencial conflicto de tener cantidades fijas asignadas y ventiladores no compatibles muy cerca entre sí en un sistema de ductos. En este caso podrían resultar problemas como una presión requerida excesiva o ventiladores obligados a operar muy afuera de su curva designada.

La Figura 25 muestra el cuadro de diálogo usado para alimentar los datos de cantidad fija.

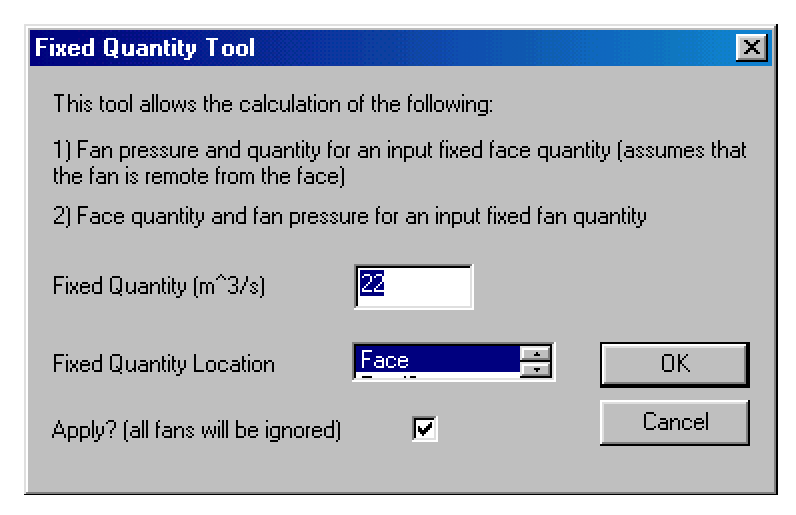


Figura 25: Cuadro de diálogo de herramienta de cantidad fija

La Herramienta de Cantidad fija (Fixed Quantity Tool) por lo general se usa para determinar los requisitos del ventilador para instalaciones sencillas de ducto de un solo ventilador, o para ayudar a determinar un requisito de energía de ventilador aproximada para un sistema de ducto propuesto. Los resultados del cálculo de las cantidades de frente y de ventilador predichas, y la presión de ventilador requerida. Esta información se proporciona en la Vista Resultados (Results View).

3.7 Bloc de notas

El programa DuctSIM tiene un bloc de notas que permite al usuario anotar datos descriptivos sobre el escenario de modelado en particular. El diálogo del bloc de notas se abre con el menú Herramientas (Tools). Este cuadro de diálogo se muestra en la Figura 26. El contenido del texto del bloc de notas se guarda como parte del archivo DuctSIM, sin embargo este contenido no se imprime bajo ninguna de las vistas.

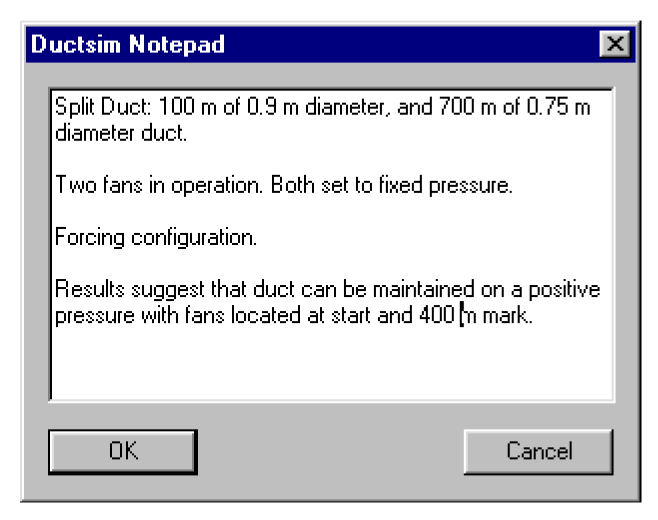


Figura 26: Bloc de notas

4 PARA VER LOS RESULTADOS

Después de alimentar todos los datos requeridos, el usuario realiza la simulación ya sea seleccionando Herramientas/Ejecutar (Tools/Execute) en el menú, o presionando el botón Ejecutar (Execute). Esta simulación también se realiza automáticamente cuando se abre un archivo existente. Si hay un error relacionado con los datos alimentados aparece un cuadro de mensaje indicando la naturaleza exacta de ese error. Si no aparece cuadro de error entonces la simulación se ha ejecutado con éxito. Todas las vistas se actualizan automáticamente.

Hay cuatro vistas principales para presentar el resultado del programa DuctSIM: Vista Resultados (Results View), que proporciona un resumen de los datos importantes obtenidos de la simulación; Vista Resultados de Ventilador (Fan Results View), una vista tabular que proporciona una lista de los detalles sobre cada ventilador; la Vista Curva de Ventilador (Fan Curve View), un trazado gráfico de la curva de ventilador con una lista de los datos de operación), y la Vista Gráfico (Graph View) que traza las tendencias de flujo y presión contra la longitud y muestra un esquemático del ducto.

4.1 Vista Resultados

La Vista Resultados proporciona un resumen de los principales resultados (ver Figura 27). Se proporciona la siguiente información:

- Datos generales – Área de ducto, perímetro, longitud de cada segmento de ducto (longitud total/100), número de mallas (preestablecido en 100), y el número de iteraciones si se usa la técnica Hardy Cross.
- Datos de resistencia – Resistencia de ducto total, resistencia por segmento del ducto (1/100 de la resistencia total) resistencia de cada trayectoria de fuga y el coeficiente de pérdida por choque total.
- Datos de ventilador o cantidad fija – La cantidad de aire en el primero y último segmentos del ducto, si la simulación es una corrida de cantidad fija o una simulación de ventilador, y si la ejecución es para una cantidad fija, se requiere la presión del ventilador.
- Si hay zonas incluidas, se proporciona el área del ducto, perímetro, resistencia por segmento de ducto y la resistencia de cada trayectoria de fuga para cada zona.

4.2 Vista Resultados de Ventilador

La Vista Resultados de Ventilador proporciona una lista tabular de los ventiladores y puntos de operación predichos (ver Figura 28). Los siguientes datos aparecen en la tabla:

- Distancia del ventilador en el ducto
- Datos descriptivos acerca del ventilador
- Presión total del ventilador
- Cantidad del ventilador
- Eficiencia del ventilador
- Energía de aire = presión del ventilador x cantidad del ventilador
- Energía de entrada del ventilador = energía de aire/eficiencia del ventilador

- Una etiqueta indicando si el ventilador está operando dentro de la curva o fuera de ella.

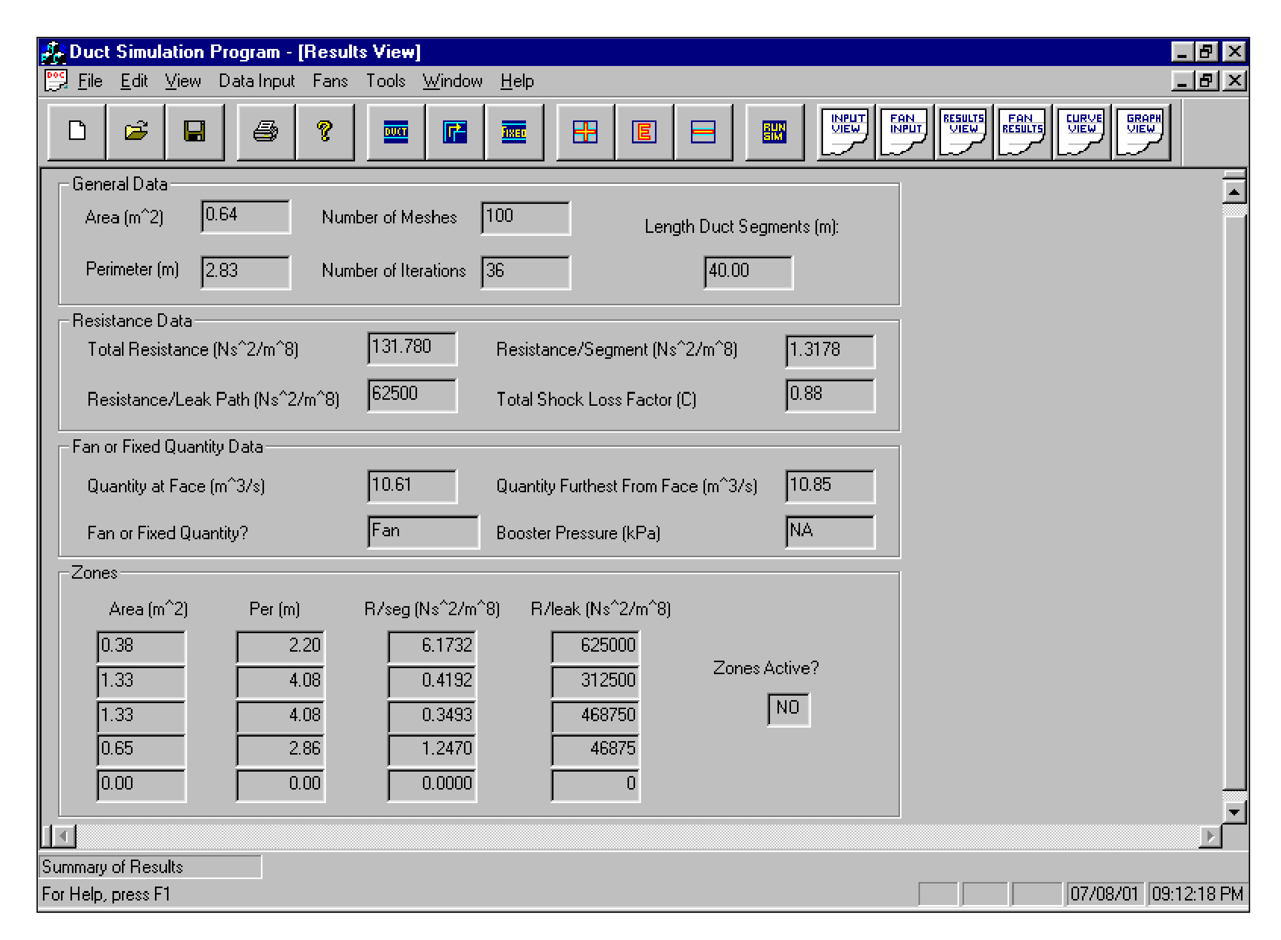
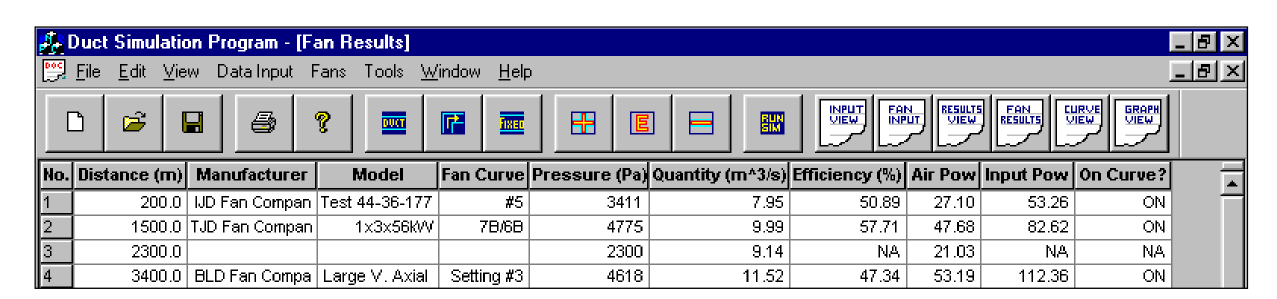


Figura 27: Vista Resultados

El ventilador está fuera de la curva si el punto de operación cae fuera del rango definido por los puntos alimentados. El punto de operación puede estar fuera en el lado izquierdo de la curva, lo que sugiere que la resistencia del sistema es demasiado alta, o en el lado derecho, lo que sugiere que el ventilador es demasiado pequeño para la aplicación (ver la Figura 20). Si se especifica una presión fija, entonces aparece “NA” en la eficiencia, energía de entrada y columnas de “en curva” para ese ventilador.



No.	Distance (m)	Manufacturer	Model	Fan Curve	Pressure (Pa)	Quantity (m^3/s)	Efficiency (%)	Air Pow	Input Pow	On Curve?
1	200.0	IJD Fan Compan	Test 44-36-177	#5	3411	7.95	50.89	27.10	53.26	ON
2	1500.0	TJD Fan Compan	1x3x56kW	7B/6B	4775	9.99	57.71	47.68	82.62	ON
3	2300.0				2300	9.14	NA	21.03	NA	NA
4	3400.0	BLD Fan Compa	Large V. Axial	Setting #3	4618	11.52	47.34	53.19	112.36	ON

Figura 28: Vista Resultados de Ventilador

4.3 Vista Curva de Ventilador

La Vista Curva de Ventilador muestra las características de operación para cada ventilador en el proyecto. Los datos se presentan en una vista divida que consiste en:

1. Una vista en formato a la izquierda que proporciona una lista de los datos descriptivos del ventilador, densidad de aire y las características de operación del ventilador (presión, cantidad, eficiencia y energía). Esta hoja tiene dos listas desplegables que permiten al usuario cambiar entre ventiladores y seleccionar qué datos trazar.
2. Una vista gráfica en el lado derecho traza la curva de operación del ventilador. El usuario también tiene la opción de superponer la energía/caballos de fuerza del ventilador sobre cada punto de datos en la curva. Estos puntos de datos se deben leer en el eje ***y*** secundario. Los puntos de operación del ventilador para presión, cantidad y energía se indican usando líneas rojas.

Esta vista proporciona una perspectiva visual de las características de operación para cada ventilador del sistema. El usuario experimentado será capaz de identificar factores como:

- Ventiladores operando muy cerca de, o en condiciones de atascamiento
- Ventiladores que nos den un tamaño incorrecto
- Operación ineficiente

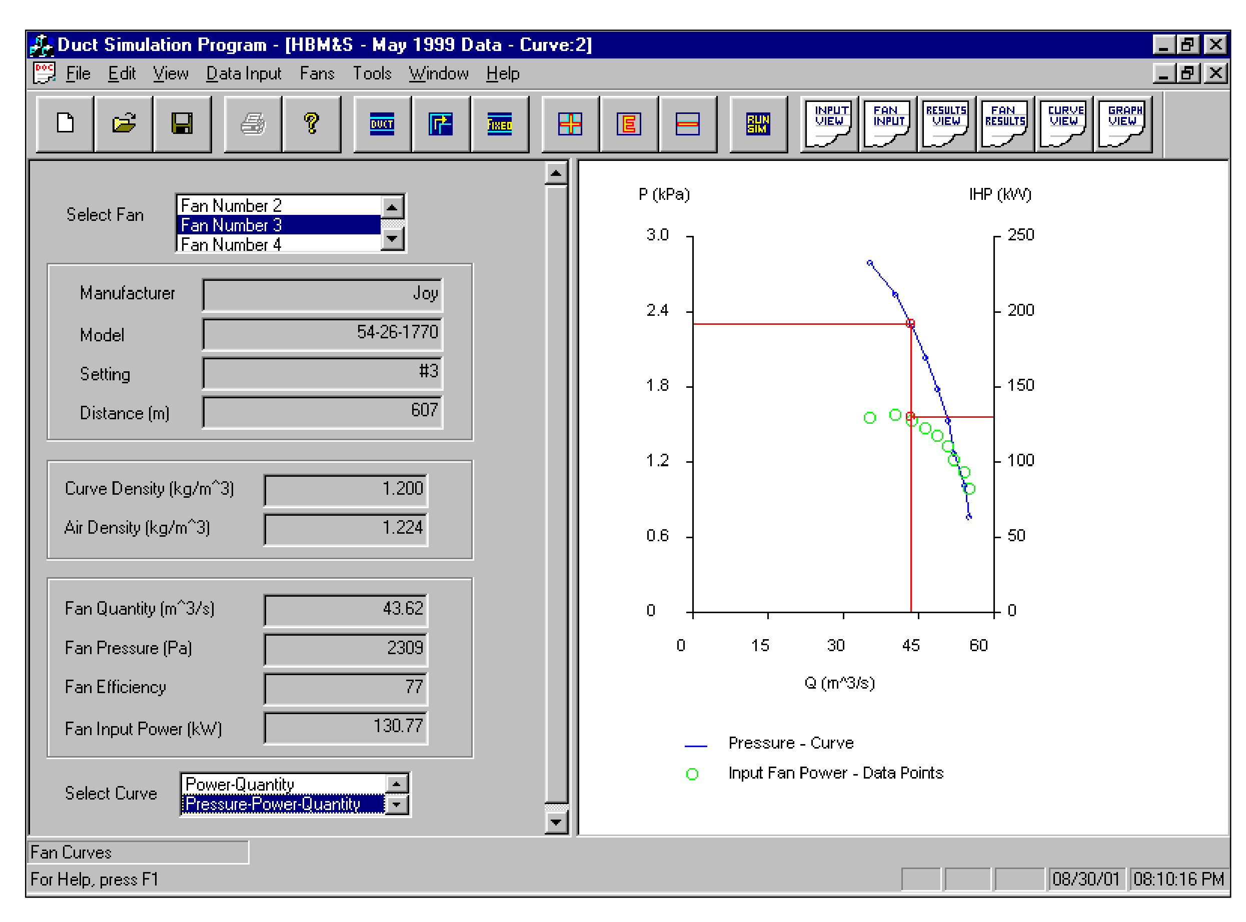


Figura 29: Vista Curva de Ventilador

4.4 Vista Gráfico

La Vista Gráfico permite al usuario trazar tendencias de flujo de aire y presión contra la longitud del ducto. También se incluye un esquemático del ducto mostrando la ubicación y tipo de pérdidas por choque y ventiladores, y la dirección del flujo de aire. El usuario puede etiquetar qué tendencias trazar en la gráfica, y qué información dibujar en el esquemático usando el cuadro de diálogo Gráfica de Tendencias (Graph Trends) (ver Figura 30).

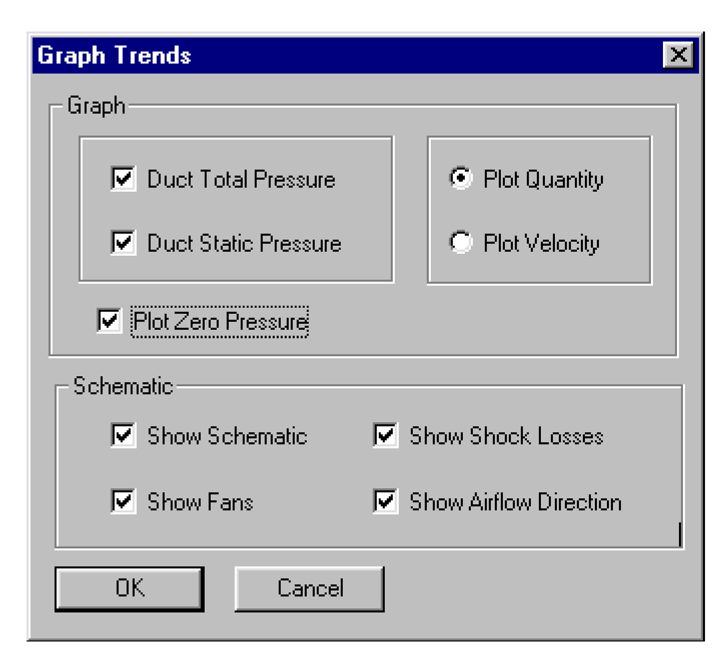


Figura 30: Cuadro de diálogo de preferencias de gráfica

Para la tendencia del flujo de aire el usuario puede seleccionar si trazar la cantidad en el ducto o la velocidad del aire. Para la tendencia de presión el usuario puede seleccionar la presión total y/o la presión estática del ducto. La diferencia entre estas tendencias en cualquier punto a lo largo del ducto representa la presión de velocidad del ducto. En la Sección 3.4.3.2 se proporciona información detallada sobre los perfiles de presión del ducto, y se muestra además en la Figura 21.

La Figura 31 muestra un trazado típico en la Vista Gráfico. La región superior de la pantalla muestra la gráfica en sí misma, en tanto que el área de abajo muestra el esquemático del ducto. En este caso la gráfica está mostrando el trazado de la presiones estática y total (eje y primario) y la velocidad del aire en el ducto (eje y secundario). La tendencia de la presión total se muestra con la línea continua azul, la presión estática con la línea continua verde, y la tendencia de la velocidad con la línea punteada roja. La línea de presión cero se muestra con una línea punteada azul. El esquemático muestra que hay dos ventiladores en el ducto, y que el ducto es un sistema de inyección. La configuración de la entrada del ducto es una boca de campana, con un difusor a la salida. Se muestran dos pérdidas por choque, con códigos SE y D. En el esquemático se usan los siguientes códigos de pérdida por choque:

- SE - Codo liso
- ME - Codo de inglete
- D - Amortiguador
- S - Malla
- FR - Resistencia fija

Hay un pico de presión súbito a través de cada ventilador que puede resultar en presiones negativas en el lado de entrada y una gran presión positiva en la descarga. Para el caso mostrado en la Figura 31 el ducto se mantiene en presión positiva. Si las tendencias de presión se vuelven negativas en el lado de entrada de los ventiladores, y se está usando ducto flexible, se tendrá que cambiar el tamaño o espaciado de los ventiladores. Si el ducto fuera rígido con zonas de presión negativa, entonces ocurriría recirculación a lo largo del ducto. La pérdida por presión asociada con el amortiguador también se puede ver en la tendencia de presión, donde ocurre un cambio de paso. No es este el caso con la pérdida por choque del codo liso, que tiene una resistencia mucho más baja, y la pérdida de presión más pequeña asociada. El cambio de paso en la velocidad se debe a que hay dos zonas discretas para este ducto, cada una con un área diferente. Ver en la Sección 3.2.3 una descripción detallada del concepto de zonas.

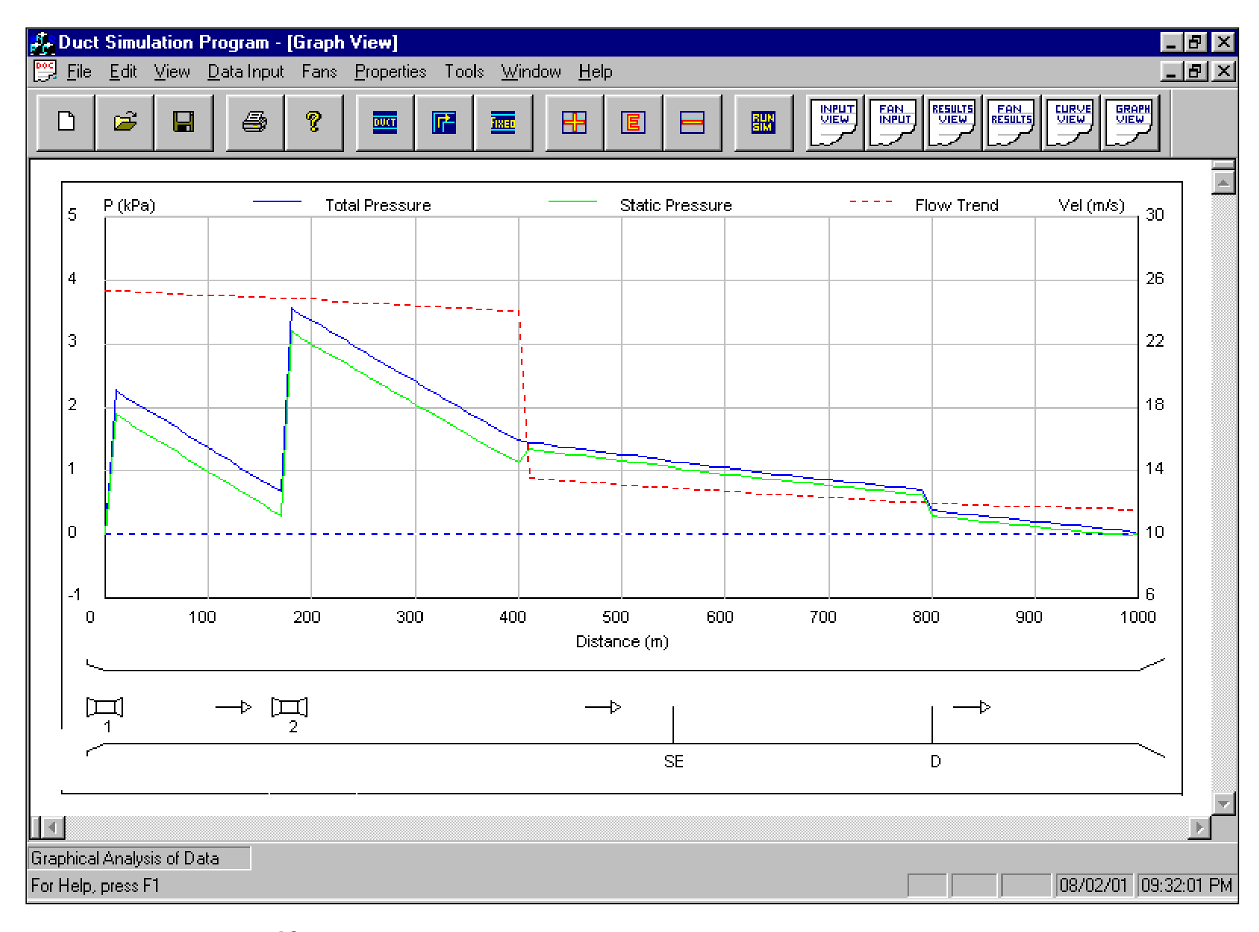


Figura 31: Vista Gráfico

La Vista Gráfico por lo general es el método primario de examinar los resultados para cada simulación. Usando un método iterativo de mover y cambiar ventiladores el sistema de ductos se puede optimizar con rapidez para lograr las necesidades de flujo de aire en el frente, y reducir al mínimo o evitar las presiones de ducto negativas o la recirculación.

4.5 Impresión

La impresión de los datos alimentados y los resultados arrojados se realiza vista por vista seleccionando Vista Previa (Print Preview) o Imprimir (Print). El tipo de letra de la impresora

está preestablecido para asegurar que sea legible. Para las vistas tabulares se recomienda que la impresora se configure en orientación horizontal y que se cambie el tamaño de las columnas (y se oculten si es necesario) para asegurar que la información pertinente quepa en una sola hoja.

Las Vistas Alimentación de Ventilador y Resultados de Ventilador no se imprimen como tablas (como se puede ver en la pantalla). La impresión de la Vista Alimentación de Ventilador proporciona información descriptiva del ventilador, distancia en el ducto, y una lista de las curvas de ventilador alimentadas. En la Figura 32 se muestra un ejemplo de esta impresión. La Vista Curva de Ventilador no tiene la opción de Imprimir o Vista Previa. Las curvas de ventilador se imprimen en la Vista Resultados de ventilador. La impresión en esta vista contiene información sobre una base ventilador por ventilador (similar a la Vista Alimentación de Ventilador). En la Figura 33 se muestra un ejemplo de esta impresión.

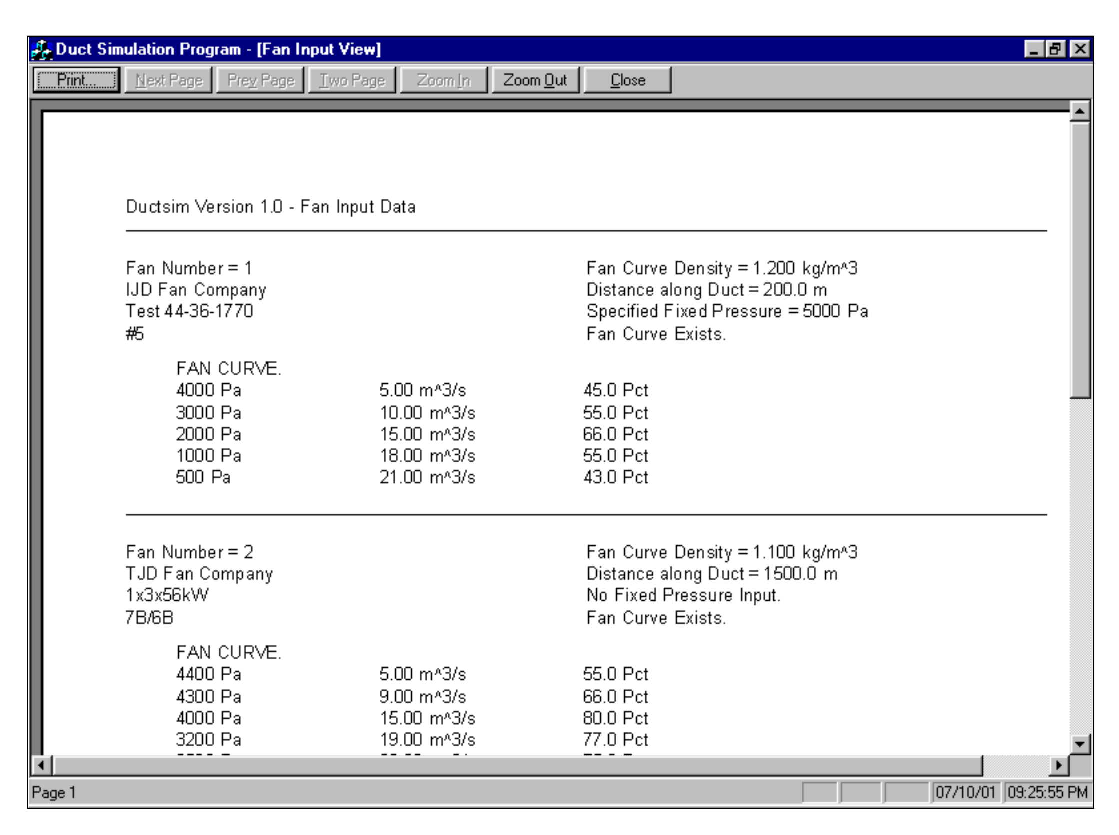


Figura 32: Vista previa para impresión de la Vista Alimentación de Ventilador

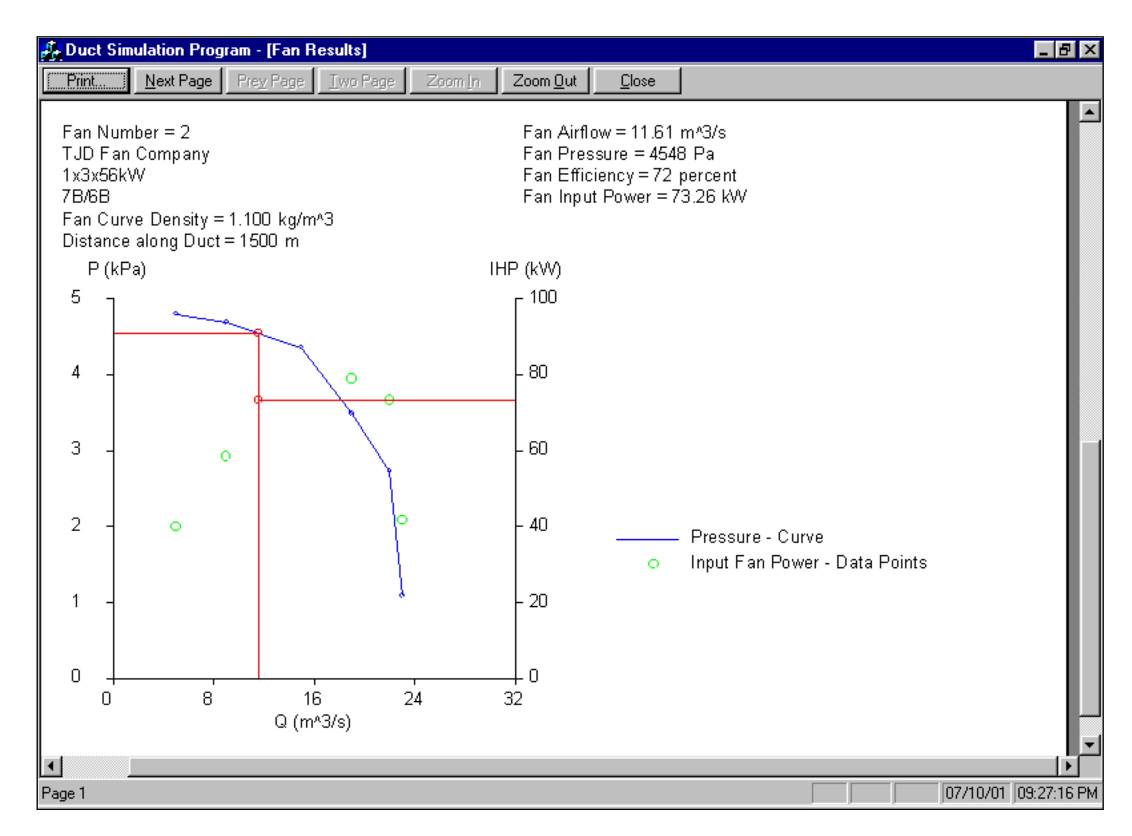


Figura 33: Vista previa para impresión de la Vista Resultados de Ventilador

5 REFERENCIAS

ASHRAE Handbook, 1989, “Fundamentals,” I-P Edition, Published by the American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning, Inc., pp. 32.27 – 32.52.

Black S. and Banerjee B., 1978, “Effect of Continuous Miners on the Generation of Respirable Dust,” Mining Congress Journal, March 1978, pp. 19-25.

Browning E.J., 1983, "An Approximate Method for Auxiliary Ventilation Simulations," The Mining Engineer, September, pp. 129 - 134.

Calizaya F., and Mousset-Jones P., 1993, "A Method of Designing Auxiliary Ventilation Systems for Long Single Underground Openings," Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium, SME, Littleton, CO, USA, pp. 245 - 250.

Calizaya F., and Mousset-Jones P., 1997, “Estimation of Leakage Quantity for Long Auxiliary Ventilation Systems,” Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress, SME, Littleton, CO, USA, pp. 475 - 478.

Duckworth I.J., 1999, “Second Year Annual Report,” Unpublished, The University of Nottingham, October, 23 p.

Duckworth I.J. and Lowndes, I., 2000, "DuctSIM: The Development of a Visual Duct Simulation Program," 2000 AIME-SME Annual Meeting and Exhibit, SME, Littleton, CO, USA.

Duckworth I.J. and Lowndes, I., 2001, "The Modelling of Fan and Duct Systems in Extended Headings," Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Krakow, Poland.

Gracie A., Howard G., and Job B., 1981, “Analysis of Leaky Auxiliary Ventilation Systems by Microcomputer,” The Mining Engineer, Vol. 140, No. 236, May, pp. 850 – 851.

Gillies A.D.S. and Wu H.W., 1999, “A Comparison of Air Leakage Prediction Techniques for Auxiliary Ventilation Ducting Systems,” Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium, University of Missouri-Rolla Press, Rolla, Missouri, USA.

Hall, C.J., 1981, “Mine Ventilation Engineering,” American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., Printed by Lucas-Guinn, Hoboken, NJ.

Howden Buffalo, 1999, “Fan Engineering: An Engineer’s Handbook On Fans and their Applications,” Ninth Edition, Published by Howden Buffalo, Inc., Buffalo, New York.

JM Aerofoil Fans, Bulletin JMA60-99, June 1999.

Le Roux W.L., 1990, “Le Roux’s Notes on Mine Environmental Control,” The Mine Ventilation Society of South Africa, CTP Book Printers, South Africa.

McPherson, M. J., 1993, “Subsurface Ventilation and Environmental Engineering,” Published by Chapman & Hall, pp. 134-140.

Meyer C.F., 1990, “Determining the Friction Losses of Underground Ventilation Ducting,” Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa, October, pp. 191 – 196.

Metcalf J.R., 1958, “Leakage in Ventilation Tubing,” Mining Magazine, Vol. 98, No. 5, May, pp. 274 – 277.

Mine Ventilation Society of South Africa, 1989, “Environmental Engineering in South African Mines,” Printed by CTP Book Printers, South Africa.

Schauenburg Flexadux Corporation, “Designing a Mine Auxiliary Ventilation System,” Published Product Literature by Schauenburg Flexadux Corporation, 12 p.

Vutukuri V.S., 1984, "Study of Variables in Auxiliary Ventilation," The Institution of Mining and Metallurgy, January, pp. A10 – A14.

Vutukuri V.S. and Lama R.D., 1986, “Environmental Engineering Mines” Cambridge University Press, Melborne.

Vutukuri V.S., 1993, "An Appraisal of the Accuracy of Various Formulas for the Design of a Simple Auxiliary Ventilation System," Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium, SME, Littleton, CO, USA, pp. 145 - 150.

Wolski J., and Barry J., 1997, "Analysis of Multi-Fan Ventilation Duct Line: Resistance, Leakage, Fan Performance," Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Symposium, SME, Littleton, CO, USA, pp. 543 - 547.

APÉNDICE A – DATOS MEDIDOS

Medidas de campo

Al tomar medidas de ductos en galerías ciegas las medidas se pueden dividir en tres categorías principales:

- Medidas de cantidad de flujo de aire
- Medidas de presión
- Medidas psicométricas

Medidas de cantidad de flujo de aire

La Primera Ley de Kirchhoff establece que el flujo de masa entrando a una unión equivale al flujo de masa que sale de esa unión. Se parte del supuesto de que el flujo de aire es incompresible, y dado que la cantidad es igual al flujo de masa dividido entre la densidad del aire (constante en este caso), entonces para una galería ciega el flujo de aire que entre a la galería debe ser igual al que sale de la galería. Por tanto, el flujo de aire en el ducto en cualquier punto a lo largo de la galería es igual al flujo de aire en la entrada. Considerando esto, la persona que tome las medidas tiene dos opciones:

1. Medir el flujo de aire en la entrada directamente usando un instrumento adecuado – como un anemómetro de aspas calibrado.
2. Medir el flujo de aire en el ducto. Esto se puede hacer directamente usando un instrumento adecuado (tal vez un anemómetro de cable energizado con una sonda extensible para meterla en el ducto), o indirectamente midiendo la presión de velocidad del ducto.

En este manual se sugiere que la tasa de flujo en la galería se mida tomando medidas transversales de presión de velocidad en ciertos puntos a lo largo del ducto. Si bien ciertamente es más rápido medir el flujo de aire directamente en la entrada, por lo general esto es menos exacto, en particular cuando hay fugas importantes en el ducto (lo que tiene como resultado aire turbulento cerca del ducto).

La tasa de flujo en una sección transversal en particular del ducto se puede determinar midiendo la presión de velocidad local en varios puntos fijos para establecer la distribución integrándose en el área. El perfil de velocidad en el ducto dependerá del Número Reynolds, aspereza relativa y perturbaciones corriente arriba. Uno de los métodos más comunes para establecer las ubicaciones de cada estación transversal de punto fijo es dividir el ducto en varias áreas iguales y tomar medidas en el centro de cada una. Una de las técnicas más exactas de ubicar estos puntos es el método *log-linear*, que se basa en el perfil de velocidad para flujo completamente turbulento. Las ubicaciones se presentan en la Tabla 6.

Las presiones de velocidad se reducen a valores de velocidad usando la densidad de aire medida, con la Ecuación 16. Los valores de velocidad de aire se convierten entonces a un flujo de aire de ducto total usando la siguiente relación (donde **n** indica el número de puntos conforme a la Tabla 6):

Ecuación 21 – Velocidad de aire en el ducto: $Q = A\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i$

Num. puntos (n)	Ubicación de punto de medición Fracciones de un diámetro medidos dese el lado del ducto											
6				0.032	0.135	0.321	0.679	0.865	0.968			
8			0.021	0.117	0.184	0.345	0.655	0.816	0.883	0.978		
12	0.014	0.075	0.114	0.183	0.241	0.374	0.626	0.759	0.817	0.886	0.925	0.986

Tabla 6: Posiciones transversales *Log-linear* en un ducto circular (según McPherson 1993)

Mediciones de presión

Las presiones se miden en el ducto usando un tubo estático de pitot, conectado a un micro manómetro calibrado. El dispositivo estático de pitot permite medir la presión total, la estática y la de velocidad. En la Sección 3.4.3.2 se proporciona una explicación del concepto de presión.

El tubo estático de pitot consiste en dos tubos concéntricos. Cuando se sostienen de frente al flujo de aire el tubo interior queda sujeto a la presión total de la corriente de aire en movimiento. El tubo exterior está perforado con un anillo de pequeños agujeros perforados perpendiculares a la dirección de la corriente de aire. El tubo exterior por tanto no se ve influenciado por la energía cinética del aire, y registra solo la presión estática. Un manómetro conectado a través de las dos perforaciones reporta la presión de velocidad.

Medidas psicométricas

Para determinar la densidad del aire en el ducto, es necesario medir ciertas propiedades psicométricas del aire. Esto por lo general consiste en la presión barométrica, y las temperaturas del aire de bulbo húmedo y bulbo seco. A partir de estos valores se pueden evaluar muchas propiedades importantes, entre las cuales la densidad del aire real no es la menos importante. La Tabla 7 proporciona el proceso para derivar la densidad del aire a partir de datos psicométricos medidos. Se sugiere que se desarrolle una hoja de cálculo para ayudar con los cálculos, y que los cálculos se realicen en unidad SI, y después se conviertan a unidades imperiales si es necesario. La Tabla 8 proporciona una lista de símbolos para las fórmulas que se proporcionan en la Tabla 7.

Paso	Descripción	Ecuación	Unidades
1	Calor latente de evaporación	$L = (2502.5 - 2.386t) \times 1000$ For L_w, use t_w. For L_{ws}, use t_{ws}.	J/kg
2	Presión de vapor saturada	e_s**Error! Bookmark not defined.** $= 610.6\exp\left(\frac{17.27t}{t + 237.3}\right)$ For e_{sw}, use t_w. For e_{sd}, use t_d.	Pa
3	Presión de vapor real (de X y P)	$e = \frac{PX}{X + 0.622}$	Pa
4	Presión de vapor real (de P, t_d, y t_w)	$e = e_{sw} - \frac{C_{pa}P(t_d - t_w)}{0.622L}$	Pa

Paso	Descripción	Ecuación	Unidades
5	Contenido de humedad	$X = 0.622 \frac{e}{P - e}$	kg/kg dry
6	Constante de gas de aire no saturado	$R_m = \frac{R_a + XR_v}{X + 1}$	J/kgK
7	Calor específico de aire no saturado	$C_{pm} = \frac{C_{pa} + XC_{pv}}{X + 1}$	J/kgK
8	Densidad real de aire (de P, e, t_d)	$\rho = \frac{P - 0.378e}{R_a\left(t_d + 273.15\right)}$	kg moist air/m^3
9	Densidad aparente de aire	$\rho_{app} = \frac{P - e}{R_a\,(t_d + 273.15)}$	Kg dry air/m^3
10	Humedad relativa	$rh = \frac{e}{e_{sd}} \times 100\%$	%
11	Entalpía	$H = C_{pa}t_d + X[C_w t_w + L + C_{pv}(t_d - t_w)]$	J/kg dry air
12	Calor Sigma	$S = H - XC_w t_w$	J/kg dry air

Tabla 7: Relaciones psicométricas

Símbolo	Descripción	Unidades
C_{pa}	Calor específico de aire seco a presión constante	J/kgK
C_{pm}	Calor específico de aire no saturado	J/kgK
C_{pv}	Calor específico de vapor de agua a presión constante	J/kgK
C_w	Calor específico de agua líquida	J/kgK
E	Presión de vapor real	Pa
e_s	Presión de vapor saturada	Pa
e_{sd}	Presión de vapor saturada a temperatura de bulbo seco	Pa
e_{sw}	Presión de vapor saturada a temperatura de bulbo húmedo	Pa
H	Entalpía	J/kg aire seco
L_w	Calor latente de evaporación a temperatura de bulbo húmedo	J/kg
L_{ws}	Calor latente de evaporación a temperatura de superficie húmeda	J/kg
P	Presión barométrica	Pa
R_a	Constante de gas para aire seco	J/kgK
R_m	Constante de gas para aire no saturado	J/kgK
R_v	Constante de gas para vapor de agua	J/kgK
Rh	Humedad relativa	%
ρ	Densidad de aire no saturado	kg/m^3
ρ_{app}	Densidad aparente	kg dry air/m^3
S	Calor Sigma	J/kg dry air
t_d	temperatura de bulbo seco	°C
t_w	temperatura de bulbo húmedo	°C
t_{ws}	temperatura de superficie húmeda	°C
X	Contenido de humedad	kg humedad/kg seco

Tabla 8: Lista de símbolos para los cálculos psicométricos

APÉNDICE B – PROGRAMA DUCTCON

El programa Ductcon se desarrolló para facilitar la reducción de datos de campo de ductos. Esta es una aplicación auxiliar de DuctSIM, sin embargo el programa es completamente discreto. Los resultados incluyen fugas de ductos importantes y constantes de resistencia. Estas constantes se pueden usar después en el programa DuctSIM.

La teoría usada en el programa DuctSIM se detalla en el cuerpo principal del manual. Las principales ecuaciones incluyen la Ecuación 3 (Ecuación de Atkinson), la Ecuación 14 (Ecuación de Woronin) y la Ecuación 15 (Fórmula de Browning).

La aplicación consiste en dos vistas principales, llamadas Vista Alimentación (Input View) y Vista Resultados (Results View).

Alimentación de datos en Ductcon

Los datos del ducto se alimentan usando el cuadro de diálogo Añadir Datos de Ducto (Add Duct Data). Ya sea seleccionando Ducto/Añadir Datos (Duct/Add Data) del menú o presionando el botón "Añadir" (Add) en la barra de herramientas. Un ejemplo de este cuadro de diálogo se muestra en la Figura 34.

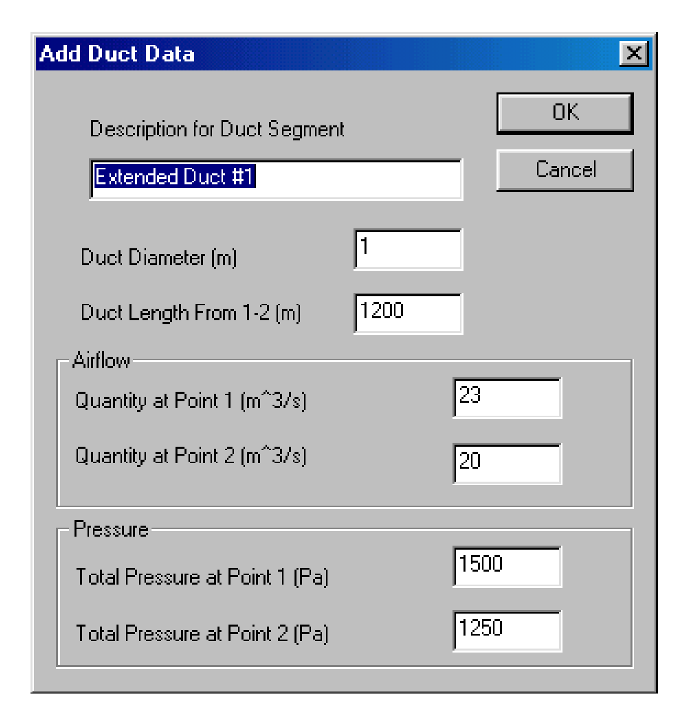


Figura 34: Cuadro de diálogo para añadir datos de ducto en Ductcon

El usuario tiene que alimentar el diámetro del ducto y la longitud del segmento, y después el flujo de aire medido y los datos de presión para cada extremo del segmento de ducto. Observar las siguientes reglas al alimentar los datos:

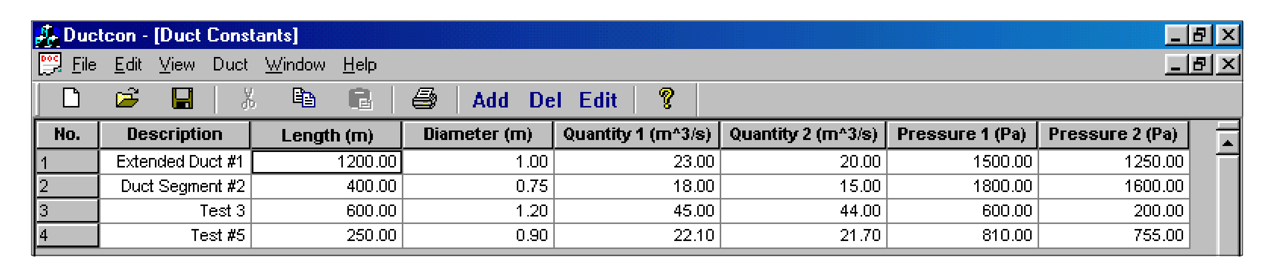
1. Se debe usar una sección de ducto sin ventiladores.
2. Los puntos se deben elegir de manera que la cantidad en el punto 1 sea más alta que en el punto 2.
3. Los valores de cantidad deben ser positivos.

4. La presión en el punto 1 debe ser más grande que en el punto 2.
5. Los valores de presión deben ser positivos.
6. Los valores de presión deben ser la presión total del manómetro (promedio) medida en cada estación.

Las reglas anteriores son para un sistema de ducto de inyección, donde la cantidad y la presión de pared del ducto se reducen conforme aumenta la distancia a lo largo del ducto. El programa se puede usar para ductos de extracción alimentando las presiones de ducto negativas como valores positivos (de manera que la presión más alta siga correspondiendo a la cantidad más alta).

<u>Vista Alimentación</u>

Conforme se añaden ductos, aparecen en la lista en la Vista Alimentación (Input View). Estos ductos se pueden editar o suprimir del proyecto ya sea usando el menú de Ductos o los botones Editar y Suprimir (Edit, Delete) en la barra de herramientas. Un ejemplo de la Vista Alimentación se muestra en la Figura 35. En la tabla aparece una lista con la descripción del ducto, y sus datos de longitud, diámetro, cantidad y presión.



No.	Description	Length (m)	Diameter (m)	Quantity 1 (m^3/s)	Quantity 2 (m^3/s)	Pressure 1 (Pa)	Pressure 2 (Pa)
1	Extended Duct #1	1200.00	1.00	23.00	20.00	1500.00	1250.00
2	Duct Segment #2	400.00	0.75	18.00	15.00	1800.00	1600.00
3	Test 3	600.00	1.20	45.00	44.00	600.00	200.00
4	Test #5	250.00	0.90	22.10	21.70	810.00	755.00

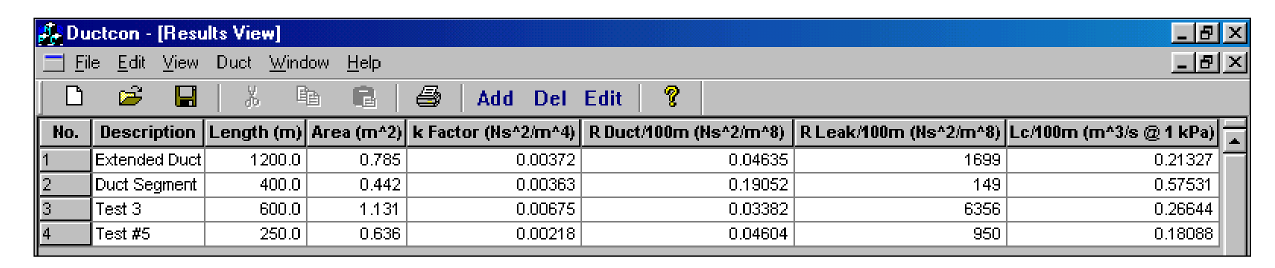
Figura 35: Vista Alimentación en Ductcon

Resultados de Ductcon

Los cálculos se realizan automáticamente conforme se añade cada ducto al proyecto. Los resultados se presentan en la Vista Resultados (Results View) (ver la Figura 36). Se incluyen los siguientes resultados:

1. Área del ducto.
2. Resistencia del ducto por 100m (100 pies) – con base en la aproximación de Browning (1983) (ver Ecuación 15).
3. Factor de fricción de Atkinson – evaluado a partir de la resistencia del ducto por 100m (100 pies) y la geometría del ducto (ver Ecuación 3).
4. Resistencia de las trayectorias de fuga por 100 m con base en la Ecuación de Woronin (ver Ecuación 14).
5. La constante de fuga para el ducto – L_c con base en la aproximación de Browning (1983) (ver Ecuación 22).

Ecuación 22 – Coeficiente de fuga: $$L_c = \frac{3(Q_1 - Q_2)(P_1 - P_2)}{2L(P_1^{1.5} - P_2^{1.5})}$$



No.	Description	Length (m)	Area (m^2)	k Factor (Ns^2/m^4)	R Duct/100m (Ns^2/m^8)	R Leak/100m (Ns^2/m^8)	Lc/100m (m^3/s @ 1 kPa)
1	Extended Duct	1200.0	0.785	0.00372	0.04635	1699	0.21327
2	Duct Segment	400.0	0.442	0.00363	0.19052	149	0.57531
3	Test 3	600.0	1.131	0.00675	0.03382	6356	0.26644
4	Test #5	250.0	0.636	0.00218	0.04604	950	0.18088

Figura 36: Vista Resultados de Ductcon

El programa DuctSIM requiere que el usuario introduzca datos de fugas en términos de la resistencia de la trayectoria de fuga por 100m (100 pies) de ducto. Si bien el coeficiente de fuga que se proporciona en Ductcon no se puede alimentar a DuctSIM, sí proporciona un excelente parámetro para cuantificar la calidad de una instalación de ducto. Le Roux (1990) proporciona un rango para el coeficiente de fuga, que es:

- Ducto excelente = 0.03
- Ducto bueno < 0.25
- Ducto regular = 0.5
- Ducto malo > 1.0